



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRES BELLO

Facultad de ingeniería

Escuela de Obras Civiles

CLASIFICACION SISMICA PRELIMINAR DE ARENAS EN CHILE

PRE-DIMENSIONAMIENTO ESTADISTICO DEL NÚMERO DE GOLPES DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR

Tesis de pregrado para optar al Título de Ingeniero Civil

Autor: Franco Patricio Pérez Ojeda

Profesor Tutor: Darko Edmundo Miserda Álvarez

Santiago de Chile, 2017

Índice de Contenidos

1	Introducción.....	3
1.1	Presentación del problema.....	8
2	Marco metodológico.	11
2.1	Descripción General de los Estudios de Caso	11
2.2	Revisión Bibliográfica.	12
2.3	Nspt en función del perfil de velocidad de ondas de corte.	13
2.4	Clasificación Sísmica	15
2.4.1	Clasificación sísmica Directa.....	15
2.4.2	Clasificación sísmica Completa.....	16
2.4.3	Clasificación sísmica Preliminar	17
3	Resultados de la investigación	20
3.1	Resumen de resultados de los estudios de caso.	20
3.2	Correlaciones empíricas seleccionadas	23
3.3	Estimación de NSPT en función de Vs	27
3.4	Clasificación Sísmica de los Estudios de Caso	35
3.4.1	Clasificación Sísmica Directa	35
3.4.2	Clasificación Sísmica Completa	35
3.4.3	Clasificación Sísmica Preliminar	36
3.5	Resumen de Resultados	38
4	Discusión y análisis de resultados.....	41
4.1	Principales fuentes de error.....	41
4.2	Análisis Global de los estudios de caso.	43
4.3	Discusión General	44
5	Conclusiones.....	46
6	Bibliografía	47
	ANEXO A.....	51
	ANEXO B.....	56
	ANEXO C.....	64

Índice de tablas

Tabla 1-1: “Comparación de Clasificación sísmica en Normativa sísmica moderna al redor del mundo”.....	5
Tabla 1-2: “Clasificación sísmica de suelos de fundación en la Normativa Chilena”	6
Tabla 2-1: “Clasificación sísmica Directa en Normativa Chilena”	16
Tabla 2-2: “Clasificación sísmica de suelos arenosos en la Normativa Chilena”	16
Tabla 3-1: “Información Campaña de terreno para cada estudio de caso”	23
Tabla 3-2: “Selección de ecuaciones empíricas”	23
Tabla 3-3: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. <i>Estudio de caso 1</i> ”	29
Tabla 3-4: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. <i>Estudio de caso 2</i> ”	30
Tabla 3-5: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. <i>Estudio de caso 3</i> ”	32
Tabla 3-6: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. <i>Estudio de caso 4</i> ”	33
Tabla 3-7: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. <i>Estudio de caso 5</i> ”	34
Tabla 3-8: “Clasificación Sísmica Directa para cada estudio de Caso”	35
Tabla 3-9: “Clasificación Sísmica Completa para cada estudio de Caso”	36
Tabla 3-10: “Probabilidad de éxito por intervalo <i>Estudio de Caso 1</i> ”	36
Tabla 3-11: “Probabilidad de éxito por intervalo <i>Estudio de Caso 2</i> ”	36
Tabla 3-12: “Probabilidad de éxito por intervalo <i>Estudio de Caso 3</i> ”	37
Tabla 3-13: “Probabilidad de éxito por intervalo <i>Estudio de Caso 4</i> ”	37
Tabla 3-14: “Probabilidad de éxito por intervalo <i>Estudio de Caso 5</i> ”	37
Tabla 3-15: “Clasificación Sísmica Preliminar para cada estudio de Caso”	38
Tabla 3-16: “Resumen de resultados de la clasificación Sísmica”	40

Índice de ilustraciones

Ilustración 2-1: “Perfil de velocidad de ondas de corte esquemático”	14
Ilustración 3-1: “Información Campaña de terreno, <i>Estudio de Caso 1</i> ”	20
Ilustración 3-2: “Información Campaña de terreno, <i>Estudio de Caso 2</i> ”	21
Ilustración 3-3: “Información Campaña de terreno, <i>Estudio de Caso 3</i> ”	21
Ilustración 3-4: “Información Campaña de terreno, <i>Estudio de Caso 4</i> ”	22
Ilustración 3-5: “Información Campaña de terreno, <i>Estudio de Caso 5</i> ”	22
Ilustración 3-6: “Ecuaciones aplicables para Arena”	26
Ilustración 3-7: “Ecuación promedio para Arenas”	27
Ilustración 3-8: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), <i>Estudio de Caso 1</i> ”	28
Ilustración 3-9: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), <i>Estudio de Caso 1</i> ”	28
Ilustración 3-10: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), <i>Estudio de Caso 2</i> ”	29
Ilustración 3-11: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), <i>Estudio de Caso 2</i> ”	30
Ilustración 3-12: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), <i>Estudio de Caso 3</i> ”	31
Ilustración 3-13: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), <i>Estudio de Caso 3</i> ”	31
Ilustración 3-14: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), <i>Estudio de Caso 4</i> ”	32
Ilustración 3-15: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), <i>Estudio de Caso 4</i> ”	33
Ilustración 3-16: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), <i>Estudio de Caso 5</i> ”	34
Ilustración 3-17: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), <i>Estudio de Caso 5</i> ”	34
Ilustración 4-1: “Razón entre N_1 medido y N_1 estimado en profundidad”	43

RESUMEN

La Clasificación sísmica de suelos arenosos, según lo definido por la Normativa Chilena, Decreto Supremo N°61 de 2011 (D.S. N°61), puede ser definida directamente a partir de la velocidad de ondas de corte de los primeros 30 metros (V_{S30}), siempre que el perfil de velocidad sea monótonamente creciente en profundidad, al aplicar este criterio dicha clasificación es castigada, asignando el siguiente tipo de suelo definido en la normativa. Para definir completamente la clasificación sísmica de arenas también es necesario contar con el Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar (N_{SPT}) de los primeros 30 metros, el cual es obtenido a partir de la ejecución de un sondaje Geotécnico, teniendo por resultado la ratificación o mejora de la clasificación sísmica entregada anteriormente. A partir de lo expuesto se propone una metodología para estimar el N_{SPT} a partir de la Velocidad de ondas de corte, realizando una *Clasificación Sísmica Preliminar*, que puede convertirse en una herramienta útil para el Ingeniero en el desarrollo de un estudio geotécnico.

Palabras clave: *Clasificación Sísmica Preliminar, Velocidad de ondas de corte (V_{S30}), Número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_{spt}), Decreto Supremo N°61 de 2011 (D.S. N°61).*

ABSTRACT

Site Class of sandy soils, according to Chilean Regulations, supreme decree N° 61 of 2011(D.S. N°61), can be directly define using Shear wave velocity in the first 30 meters (VS30), provided that the velocity profile is monotonically increasing in depth, in applying this criterion that classification is punished by assigning the following soil type defined in the regulations. To completely define site class is also necessary to have the blow count of the Standard Penetration Test in the first 30 meters, which are obtained by a geotechnical boring, having the possibility to ratify o improve the site class given above. Therefore it proposes a methodology to estimate the N_{SPT} based on shear waves velocity, performing a Preliminary Site class, which can be a useful tool for the engineer in the development of a geotechnical study.

Key words: *Preliminary Site Class, Shear Wave Velocity (VS30), blow count of the Standard Penetration Test (SPT-N), Supreme Decree N°61 of 2011 (D.S. N°61).*

1 Introducción

Chile ha vivido numerosos eventos sísmicos, dado que su territorio forma parte del cinturón de Fuego del Pacífico. Estos sismos se presentan en distintas magnitudes, los registrados con mayor energía han sido el terremoto de Valdivia de 1960 y el del Maule de 2010 con una magnitud de 9.5 Mw y 8.8 Mw Richter, respectivamente.

La historia de la sismología en Chile se desarrolla a partir de los eventos sísmicos catastróficos, comenzando con el terremoto de *Valparaíso (1906)*, luego del cual se creó el *Servicio sismológico de Chile*. *Valdivia (1960)* impulsó la creación de ACHISINA (*Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica*) y posteriormente entre 1966-1972 el estudio y desarrollo de la *Norma Técnica de Cálculo Antisísmico de Edificios NCh433*, la cual fue reestudiada producto del sismo de *San Antonio (1985)*, para concluir con una nueva versión en 1996 posterior al sismo de *Antofagasta (1995)*. En 2009 NCh433 se modificó, aunque al poco tiempo *Maule (2010)* gatilla nuevos cambios en la normativa.

La magnitud del sismo del Maule (2010) y la tecnología disponible hasta ese momento en Chile proporcionó una gran cantidad de información, que permitió calibrar los espectros de diseño de la normativa vigente hasta entonces. El 13 diciembre de 2011 se aprobó el Decreto Supremo N° 61(D.S. N°61) que deroga el Decreto de Emergencia N°117 de 2010, normativa que se encuentra vigente hasta la fecha. Esta define la clasificación sísmica del suelo de fundación.

En términos generales, la clasificación sísmica estima la respuesta sísmica de las estructuras en función de las características mecánicas del subsuelo local. Massa (2008), considera la clasificación sísmica del suelo de fundación un factor tan importante como la magnitud y la distancia epicentral en la predicción del comportamiento sísmico de una estructura. Al mismo tiempo, Thaker y Rao

(2011), indican que el suelo local juega un rol crucial en la amplificación sísmica de una onda, como ejemplo mencionan los daños ocurridos en la ciudad de Ahmedabad durante el sismo de Bhuj (2001), que muy probablemente, se deben al depósito sedimentario reciente y el suelo poco denso de esta ciudad, ya que se encuentra a 250 km del epicentro.

Investigaciones como Boore et al (1993), Botcherdt (1994), Martin y Dobry (1994), Anderson et al (1996), Castro et al (1997), Park y Elrick (1998), Dobry et al (2000) han identificado que los suelos sedimentarios sobre el lecho rocoso pueden amplificar las ondas sísmicas, señalando que los 30 metros superiores del suelo son de gran importancia en el comportamiento local del suelo de fundación. La Ingeniería intenta reflejar este resultado en la clasificación sísmica a través de información geológica y geomorfológica, métodos geotécnicos o métodos geofísicos, estas técnicas tienen costos y tiempos de ejecución muy variados y entregan distintos niveles en la calidad de la información.

Particularmente los métodos geofísicos han adquirido un rol fundamental en la clasificación sísmica, ya que son utilizados en la determinación de la velocidad de ondas de corte promedio de los 30 m superiores (V_{S30}), dicho parámetro es utilizado en la mayoría de los códigos modernos de edificación como es el caso de BSSC (FEMA 450) en Estados Unidos y Japón, NCSE-02 en España, COVENIN 1756-2:2011 en Venezuela. El valor de V_{S30} se determina según la ecuación 1.1:

$$V_{S30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S-i}}} \quad \text{ec. (1.1)}$$

Donde:

- V_{S-i} : Velocidad de onda de corte del estrato i.
- h_i : Espesor del estrato i.
- n : El número de estratos en 30 metros.

En la Tabla 1-1 se muestran distintas normativas que se valen de este parámetro para definir la clasificación sísmica del suelo de fundación y los rangos de V_{S30} para los distintos tipos de suelos.

Tabla 1-1: “Comparación de Clasificación sísmica en Normativa sísmica moderna al rededor del mundo”.

Fuente: Elaboración propia, Tabla actualizada a partir de Pitilakis et al (2004)

Código	Territorio	V_{S30} (m/s)				
		180	360	760	1500	
BSSC 2003 (FEMA 450)	E.E. U.U. Asia Pacífico	E	D	C	B	A
EAK2000	Grecia	D - C	C	B	A	A
EC8(ENV1998)	Europa	C	C	B	A	A
New Zealand, 2000 (Draft)	Nueva Zelanda	D ($T > 0,6s$) ($V_{S30} < 200$)	C ($T < 0,6s$) ($V_{S30} > 200$)	B	A	
NCSE - 02	España	IV ($V_{S30} < 200$)	III	II	I	
Highway Bridges Code 1998	Japón	III ($T > 0,6s$) ($V_{S30} < 200$)	II ($0,6s > T > 0,2s$) ($200 < V_{S30} < 600$)	(I)	I ($T < 0,2s$) ($V_{S30} > 600$)	
Turkey Code/98	Turquía	$Z_4 - Z_3$	$Z_3 - Z_2$	$Z_3 - Z_2 - Z_1$	Z_1	

El Artículo 5º del D.S. N°61 declara que teniendo en consideración la tecnología disponible a lo largo del país, se ha optado por centrar la clasificación sísmica en V_{S30} , ya que se estima es el parámetro más relevante en una primera aproximación. En el mismo artículo se indican los métodos y técnicas permitidos por la normativa para determinar la velocidad de propagación de ondas de corte, como *Down-hole*, *Cross-hole*, *Sonda de suspensión (PS Logging)*, *Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)* y *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)* y la Refracción de Microtremores (*ReMi*), esta última se ha popularizado en Chile por su bajo costo y rápida ejecución. El método ReMi fue presentado por Louie (2001) y mide las ondas superficiales tipo Rayleigh a partir del ruido ambiental para determinar el perfil de velocidades de ondas de corte.

El Artículo 6° del D.S. N°61 define la Clasificación Sísmica del terreno de fundación mediante distintos Tipos de Suelo, que van desde el mejor comportamiento (Suelo Tipo A) al de mayor exigencia sísmica (Suelo Tipo E)¹. En la Tabla 1-2 se establecen las propiedades geotécnicas de requisito mínimo en cada caso.

Tabla 1-2: “Clasificación sísmica de suelos de fundación en la Normativa Chilena”

Fuente: Artículo 6° de D.S. N°61 2011

Suelo Tipo		V_{S30}	RQD	q_u	N_1	S_u
		m/s		MPa	golpes /pie	MPa
A	Roca, Suelo Cementado	> 900	< 50%	> 10 ($\epsilon_{qu} < 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o firme	> 500		> 0,4 ($\epsilon_{qu} < 2\%$)	>50	
C	Suelo denso o firme	>350		> 0,3 ($\epsilon_{qu} < 2\%$)	>40	>0,05
D	Suelo Medianamente denso o firme	> 180			>30	<0,05
E	Suelo de compacidad o consistencia firme	< 180			>20	
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Donde

RQD : Rock Quality Designation, según ASTM D 6032.

Q_u : Resistencia a la compresión simple del suelo.

S_u : Resistencia al corte no drenada del suelo.

N_1 : N_{spt}^2 corregido por presión de confinamiento de 0,1 MPa.

Es importante destacar que la normativa Chilena, además de V_{S30} , considera un segundo parámetro que permite definir totalmente la clasificación sísmica de un

¹ En este estudio no se incluyen los Suelos Especiales (Suelo Tipo F: Depósitos de suelo que por sus propiedades singulares no permiten ser categorizados sólo por V_{S30} y por tanto requieren estudios especiales de amplificación de acuerdo a sus características, esta investigación no aborda el tema). Para mayor información consultar D.S. N° 61.

² Numero de golpes del ensayo de penetración estándar, hasta 2014 en Chile se determina a partir de ASTM D1586, luego se publicó NCh3364Of.2014 “Geotecnia – Ensayo de Penetración Estándar” la cual define su determinación.

suelo de fundación: En el caso de la roca se debe determinar el valor de RQD; para los suelos finos se debe obtener el valor de S_u ; en el caso de las arenas se debe realizar el Ensayo de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en Inglés). En cada uno de los casos anteriores, este 2º parámetro se debe obtener a partir de la ejecución de un sondaje geotécnico de al menos 30 m. En adelante se hará referencia a esta clasificación como **Clasificación Completa**, La cual será definida formalmente en el capítulo 2.

No obstante lo anterior, el decreto N°61 permite prescindir del sondaje, lo que se puede definir como **Clasificación Directa**. Lo anterior en el caso que sólo se disponga del perfil de Velocidad de ondas de corte (V_s) en profundidad y que dicho perfil indique claramente que V_s aumenta monótonamente con la profundidad y además, se cumpla con el requisito del parámetro V_{s30} indicado en la Tabla 1-2 para suelos que pueden clasificar como B, C, o D, es posible clasificarlos como el siguiente tipo de suelo (es decir C, D y E respectivamente) sin necesidad de otras mediciones. La Clasificación Directa será definida formalmente en el capítulo 2.

Pitilakis et al (2004) indica que la clasificación sísmica basada exclusivamente en V_{s30} , es una hipótesis simplificada, que puede conducir a resultados erróneos, especialmente en casos de formaciones geológicas profundas o en cambios abruptos de rigidez del suelo a una profundidad mayor a 30 m. De cualquier forma, la normativa Chilena castiga el tipo de suelo cuando permite la clasificación directa, dando como resultado un espectro de diseño más conservador.

1.1 Presentación del problema

Al final del Artículo 6º del D.S. N°61 se incluye una observación que dice: Cuando la información obtenida en el estudio geotécnico permite clasificarlo dentro de dos o más tipos de suelo, se debe optar por la Clasificación Sísmica que resulte más desfavorable. En términos prácticos, esto significa que al comenzar un estudio mediante la medición de ondas de corte, y suponiendo que se dan las condiciones para la Clasificación Directa, la Clasificación Completa tiene como alternativa mejorar o ratificar el resultado de la Clasificación Directa.

Al analizar la situación del párrafo anterior, teniendo en cuenta el costo del Estudio de Mecánica de suelos y al mismo tiempo la repercusión de la Clasificación Sísmica en el dimensionamiento estructural del proyecto³, es importante notar que la ejecución de un sondaje puede ser el ítem más costoso en la Clasificación Sísmica⁴ y al mismo tiempo, el espectro de diseño influye directamente en los costos directos de obra gruesa del proyecto⁵.

Como se mencionó la Clasificación Directa permite prescindir del sondaje geotécnico, abaratando el costo del Estudio de Mecánica de Suelos, al mismo tiempo el espectro de diseño será de mayor exigencia sísmica, aumentando el costo directo durante la etapa de construcción. La deducción anterior supone que la Clasificación Completa mejora la Clasificación Directa, en tal caso la decisión de ejecutar el sondaje es netamente económica, ya que se debe comparar el aumento de costo directo versus el costo del sondaje.

3 Se debe aclarar que esta investigación no considera análisis de costos, esta situación se plantea para que el lector tenga una idea de las consecuencias inmediatas de la clasificación sísmica en un proyecto de edificación.

4 En la práctica Chilena la determinación de V_{S30} normalmente se realiza en base a métodos que miden las ondas superficiales (SASW, MASW, ReMi).

5 Pellet (2015) diseña la columna de hormigón de una estructura de péndulo invertido considerando ambas opciones para la Clasificación Completa. Como resultado, las cuantías de acero aumentan entre el 15% y el 45 % al considerar la ratificación de la Clasificación Directa.

Por el contrario, cuando la Clasificación Completa ratifica el resultado de la Clasificación Directa, no se justifica el costo de la ejecución del sondaje, ya que basta con la Clasificación Directa para obtener el mismo espectro de diseño.

A partir de lo anterior se considera importante definir, si la ejecución del sondaje tendrá una repercusión positiva o no en la clasificación sísmica. Y se plantea la siguiente pregunta de investigación.

¿Es posible discernir, en base a datos de campo, si la ejecución del sondaje mejorará el resultado de la clasificación directa?

Para acotar la investigación, se ha optado por estudiar suelos que pueden clasificar sísmicamente como Suelos Tipo C, D o E según D.S. N°61 y al mismo tiempo clasifican como arena⁶ según el sistema USCS. Por lo tanto su Clasificación Sísmica Completa depende tanto de V_{S30} como de N_1 .

Como se indica en capítulos posteriores⁷ es posible encontrar en la bibliografía una gran cantidad de ecuaciones empíricas que correlacionan el Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar con la velocidad de ondas de corte⁸, por tanto, contando con un perfil de velocidad de ondas de corte es posible estimar el valor de N_{spt} .

A partir de este último antecedente se puede definir una **Clasificación Sísmica Preliminar**, la cual utiliza el valor de V_{S30} obtenido de acuerdo a la Normativa, mientras el valor N_{spt} es pre-dimensionado a partir de las ecuaciones empíricas encontradas en la Bibliografía, ambos determinados a partir de los perfiles de velocidad de ondas de corte. La clasificación sísmica preliminar será definida formalmente en el capítulo 2.

⁶ Según el sistema USCS, se puede tratar de arenas que clasifican como: SW, SP, SM, SC, SW – SM, SW – SC, SP – SM y SP – SC.

⁷ Para mayores antecedentes revisar anexo A.

⁸ Se optó por presentar correlaciones bibliográficas, ya que no se cuenta con la suficiente cantidad de datos para generar una correlación empírica en base a suelos chilenos.

Desde ya se debe aclarar, que esta investigación no pretende prescindir de la ejecución del sondaje para completar la clasificación sísmica. Por el contrario, el espíritu de esta, es justificar la ejecución del sondaje desde una perspectiva técnica, para ratificar la importancia de la clasificación completa.

En base a lo expuesto anteriormente se definen el Objetivo General de esta investigación y consecuentemente sus Objetivos Específicos.

Objetivo General

- Contrastar la *Clasificación Sísmica Preliminar* y la *Clasificación Sísmica Completa* mediante 5 estudios de caso.

Objetivos Específicos

- Seleccionar ecuaciones empíricas que correlacionan V_s con N_{spt} aplicables a suelos arenosos a partir de la bibliografía disponible.
- Pre-dimensionar el Número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_1) para cinco estudios de caso, a partir de las ecuaciones seleccionadas.
- Determinar la Clasificación Sísmica Directa, Preliminar y Completa de cada estudio de caso.

2 Marco metodológico.

En el presente capítulo se describen los distintos métodos comprometidos en el desarrollo de la investigación, desde la recopilación bibliográfica hasta la obtención de los resultados, pasando por el procesamiento de datos de los distintos estudios de caso y una breve descripción del análisis a realizar.

2.1 Descripción General de los Estudios de Caso

A partir de datos facilitados por BRAC Ingeniería S.A., una Consultora de Ingeniería Geotécnica, se escogieron estudios de mecánica de suelos para analizar en esta investigación, considerando los siguientes criterios de selección:

- La normativa sísmica aplicable debe ser NCh433 Of.2009, en conjunto a D.S. N°61 de 2011.
- Se trata de suelos que clasifican como arena según sistema USCS.
- Se determinó V_{S30} mediante sísmica pasiva.⁹
- Ambos perfiles de velocidad de onda de corte son monótonamente crecientes.
- Se realizó un sondaje geotécnico con ejecución de SPT.¹⁰

El primer criterio se asocia al contexto de la investigación, ya que no se han considerado instalaciones industriales u otras estructuras que considera Nch 2369 o normativas internacionales; el segundo tiene como fin último acotar la investigación, ya que no se consideraron suelos finos, Gravas o Roca, por tanto sólo se estudia la interacción entre dos variables; el tercer y cuarto criterio se asocian a contar con una Clasificación Sísmica Directa y a la posibilidad de

⁹ Para todos los estudios se utilizó el método de Refracción de Micro-tremores (ReMi).

¹⁰ Ya que se trata de suelos arenosos la ejecución del SPT es imprescindible.

estimar N_{spt} a partir de la velocidad de ondas S ; finalmente el último de los criterios en la lista se asocia a contar con una Clasificación Sísmica Completa.

Considerando los criterios definidos anteriormente se obtuvieron 5 estudios de mecánica de suelos, los cuales serán presentados como estudios de caso para esta investigación.

2.2 Revisión Bibliográfica.

Se estudiaron 21 investigaciones publicadas por distintos autores. Estos estudios tienen como tema central la correlación entre V_{S30} y N_{spt} , se recopilaron un total de 179 ecuaciones, las cuales presentan una gran variedad de factores que influyen en el resultado de la correlación. En términos generales, las investigaciones consultadas en la bibliografía, presentan una metodología similar, que consiste en recopilar mediciones de campo, para luego correlacionarlas estadísticamente mediante el método de los mínimos cuadrados.

Para cumplir con el primer objetivo específico se deben seleccionar ecuaciones empíricas a partir de la bibliografía, a continuación se presentan los criterios a considerar en la selección de las ecuaciones:

- El tipo de suelo, clasifica como arena según Sistema USCS.
- El modelo matemático tiene la forma de la ecuación 2.1

$$V_s = A \cdot N_{spt}^b \quad \text{ec. (2.1)}$$

Donde:

V_s : Velocidad de ondas de corte.

N_{spt} : Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar

A y b : Constantes de ajuste del modelo.

A partir de los criterios definidos en el párrafo anterior se obtuvieron 45 ecuaciones empíricas, las cuales serán utilizadas para analizar los estudios de caso.

2.3 N_{spt} en función del perfil de velocidad de ondas de corte.

Para lograr el segundo objetivo específico es necesario invertir las ecuaciones seleccionadas, las cuales presentan un modelo 2.1, obteniendo las ecuaciones según 2.2, 2.3 y 2.4.

$$N_{spt} = A' \cdot V_s^{b'} \quad \text{ec. (2.2)}$$

Donde:

$$A' = \left(\frac{1}{A}\right)^{b'} \quad \text{ec. (2.3)}$$

$$b' = \frac{1}{b} \quad \text{ec. (2.4)}$$

En la Ilustración 2-1 se presenta un perfil de velocidad de ondas de corte genérico, el ejemplo es monótonamente creciente ya que fue uno de los requisitos para escoger los estudios de caso.

En la ilustración se puede apreciar que para cada rango de profundidades se asocia una velocidad de ondas de corte, por tanto, para el mismo rango se puede Pre-dimensionar el valor del Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar a partir de la ecuación 2.2. Luego los valores estimados

de N_{spt} serán corregidos por presión de confinamiento mediante la ecuación 2.5 para presentar los resultados según lo solicitado por la Normativa.

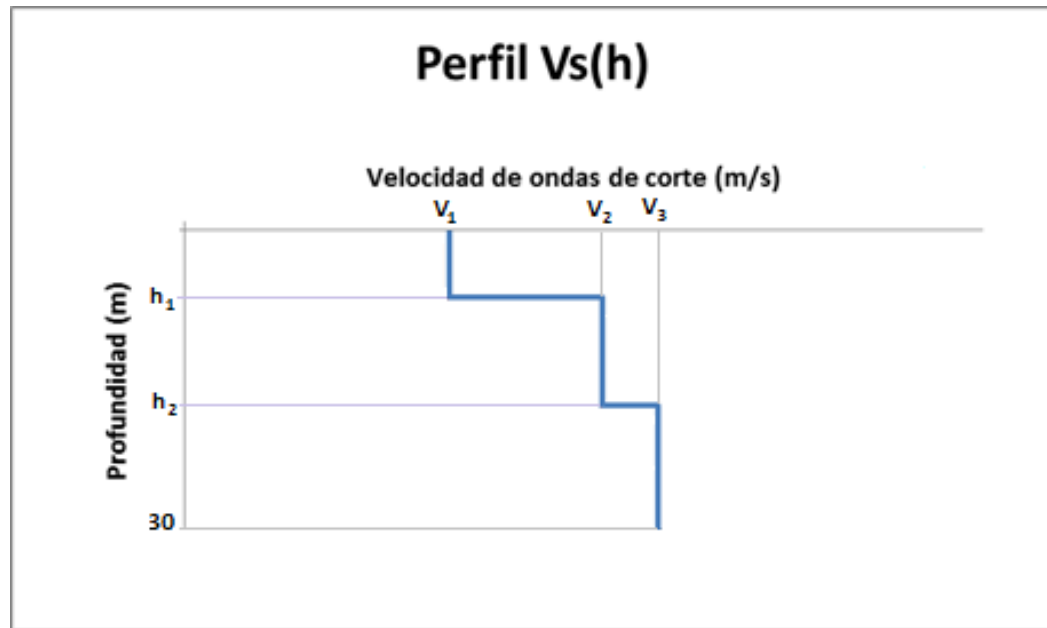


Ilustración 2-1: “Perfil de velocidad de ondas de corte esquemático”
Fuente: Elaboración propia, sin datos.

$$N_1 = C_N \cdot N_{spt} \quad \text{ec. (2.5)}$$

Para:

$$C_N = \left(\frac{P_A}{\sigma_{v0}} \right)^{0.5}, \text{ con } 0,5 < C_N < 1,7 \quad \text{ec. (2.6)}$$

Donde

P_A : Presión atmosférica 1 Kg/cm^2 .

σ_{v0} : Tensión vertical efectiva (Kg/cm^2) según ecuación 2.7.

$$\sigma_{v0} = \sum (h_{us} \cdot \gamma_t) + \sum (h_s \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w)) \quad \text{ec. (2.7)}$$

Donde

- h_{us} : Espesor de estratos individuales por sobre el nivel freático.
 h_s : Espesor de estratos individuales bajo el nivel freático.
 γ_t : Peso específico húmedo de los estratos sobre el nivel freático.
 γ_{sat} : Peso específico saturado de los estratos bajo el nivel freático.
 γ_t : Peso específico del agua.

En este caso se considerará el nivel de freático detectado en las excavaciones manuales de cada estudio de caso, ya que como se planteará más adelante, la información del sondaje no está disponible al momento de realizar la Clasificación sísmica Preliminar.

2.4 Clasificación Sísmica

El tercer objetivo específico se cumplirá a partir de lo descrito como Clasificación Sísmica Directa, Preliminar y Completa, la primera y la última de estas obedecen a lo definido por la normativa, mientras la Clasificación Sísmica Preliminar debe ser definida para esta investigación. A continuación se pasará a definir formalmente cada una de ellas.

2.4.1 Clasificación sísmica Directa.

Se denomina Clasificación sísmica Directa en el caso que sólo se disponga del perfil de Velocidad de ondas de corte (V_s) en profundidad y que dicho perfil indique claramente que V_s aumenta monótonamente con la profundidad, bajo estas circunstancias se podrá utilizar lo definido en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: “Clasificación sísmica Directa en Normativa Chilena”

Fuente: Elaboración propia, a partir de lo descrito por Artículo 6º de D.S. N°61 de 2011

Suelo Tipo		V_{S30}
		(m/s)
C	Suelo denso o firme	>500
D	Suelo Medianamente denso o firme	> 350
E	Suelo de compacidad o consistencia firme	> 180

La tabla 2-1 corresponde a la modificación de la Tabla 1-2 donde se asume que el único parámetro utilizado para la clasificación sísmica corresponde al perfil de velocidad de ondas de corte.

2.4.2 Clasificación sísmica Completa

Se denomina Clasificación sísmica Completa cuando se dispone de ambos parámetros definidos por la normativa para realizar la clasificación sísmica. Dado que la investigación se desarrolla a partir de Suelos arenosos que cumplen con los requisitos de la clasificación sísmica directa, al modificar la tabla 1-2 se puede resumir de la siguiente manera.

Tabla 2-2: “Clasificación sísmica de suelos arenosos en la Normativa Chilena”

Fuente: Elaboración propia a partir de lo descrito en Artículo 6º de D.S. N°61 2011

Suelo Tipo		V_{S30}	N_1
		(m/s)	(Golpes /pie)
B	Suelo muy denso o firme	> 500	>50
C	Suelo denso o firme	>350	>40
D	Suelo medianamente denso o firme	> 180	>30
E	Suelo de compacidad o consistencia firme	< 180	>20

2.4.3 Clasificación sísmica Preliminar

Este concepto no es definido por la Normativa, ni se encuentra en la bibliografía consultada, pero es trascendental para esta investigación definir la Clasificación sísmica preliminar y se realizará a partir del siguiente caso hipotético:

“Para el diseño y construcción de un edificio habitacional se desarrolla un estudio de Mecánica de suelos que incluye la ejecución de calicatas, la medición de la velocidad de ondas S mediante un método no invasivo y la posibilidad de ejecutar un sondaje geotécnico de 30 m de profundidad, dependiendo de los resultado del estudio sísmico.

Luego de ejecutadas las calicatas y en base a los antecedentes geológicos se verifica que el subsuelo presenta suelos arenosos. Por su parte, la medición de ondas de corte entrega información suficiente para clasificar el suelo en forma directa. Una vez ejecutados estos trabajos, el cliente consulta por la clasificación sísmica y como puede variar mediante la ejecución del sondaje geotécnico.”

Hasta el momento en el estudio hipotético, la clasificación completa presenta dos posibles resultados: mejorar o ratificar el resultado de la Clasificación Sísmica Directa. Según lo anterior y la información presentada en la Tabla 2-2 es posible definir la Clasificación Sísmica Preliminar en términos probabilísticos mediante una probabilidad condicional.

$$P(X/Y) = p \quad \text{ec. (2.8)}$$

Para:

$$X = N_{spt} > N^* \quad \text{ec. (2.9)}$$

$$Y = V_{S30} > V_s^* \quad \text{ec. (2.10)}$$

Donde:

$P(X/Y)$: Es la probabilidad de X dado Y.

N^* : La restricción según 4º columna de Tabla 2-2

Vs^* : La restricción según 3º columna de Tabla 2-2

p : probabilidad de éxito.

De acuerdo a las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 se definen éxito y fracaso en términos del resultado de la Clasificación sísmica Directa y Completa

- Éxito: La Clasificación Sísmica Preliminar estima que la Clasificación Completa mejora el resultado de la Clasificación Directa.
- Fracaso: La Clasificación Sísmica Preliminar estima que la Clasificación Completa ratifica el resultado de la Clasificación Directa.

Ya que se cuenta con 45 estimaciones de N_1 para cada intervalo, obtenidas en el segundo objetivo específico, es posible calcular la probabilidad definida anteriormente mediante las siguientes expresiones.

Sea

$$N_1 \sim N(\overline{N}_1; \sigma_{N_1}) \quad \text{ec. (2.11)}$$

Entonces es posible determinar la probabilidad de que N_1 sea mayor que un cierto N_1^* , suponiendo que éxito y fracaso son equi-probables se define el siguiente criterio de éxito:

$$p > 0,5 \forall \text{ intervalo de profundidad} \Rightarrow \text{exito} \quad \text{ec. (2.12)}$$

Es decir, cuando más del 50 % de las estimaciones de N_{spt} en cada uno de los intervalos del perfil de V_s cumple con lo solicitado por la Normativa, la Clasificación Preliminar estima que la Clasificación Completa mejorará el resultado de la Clasificación Directa.

Además dado que existen dos perfiles de velocidad de ondas de corte se puede determinar dos veces la clasificación Sísmica Preliminar por tanto si sus resultados concuerdan se puede concluir positivamente, de lo contrario se tomara el caso más desfavorable.

3 Resultados de la investigación

A partir de los objetivos específicos definidos y la metodología presentada en el capítulo anterior se presentan los resultados de esta investigación, comenzando un resumen de la información de los estudios de caso, luego las ecuaciones recolectadas en la bibliografía, la estimación de N_{spt} para cada estudio de caso y finalmente la determinación de las distintas clasificaciones Sísmicas definidas en la metodología.

3.1 Resumen de resultados de los estudios de caso.

Respecto de los estudios de caso, la información detallada será presentada en el Anexo C, identificando principalmente el resultado de la medición de ondas sísmicas a partir del método ReMi, el Número de golpes del ensayo de penetración Estándar y la estratigrafía del sondaje geotécnico. A continuación se presenta un resumen del resultado de las respectivas campañas de terreno

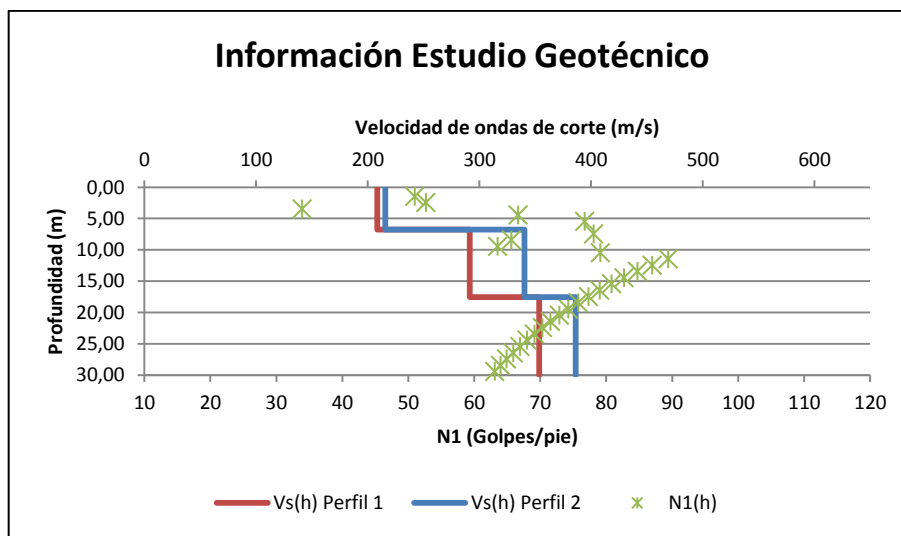


Ilustración 3-1: "Información Campaña de terreno, Estudio de Caso 1"

Fuente: Elaboración propia.

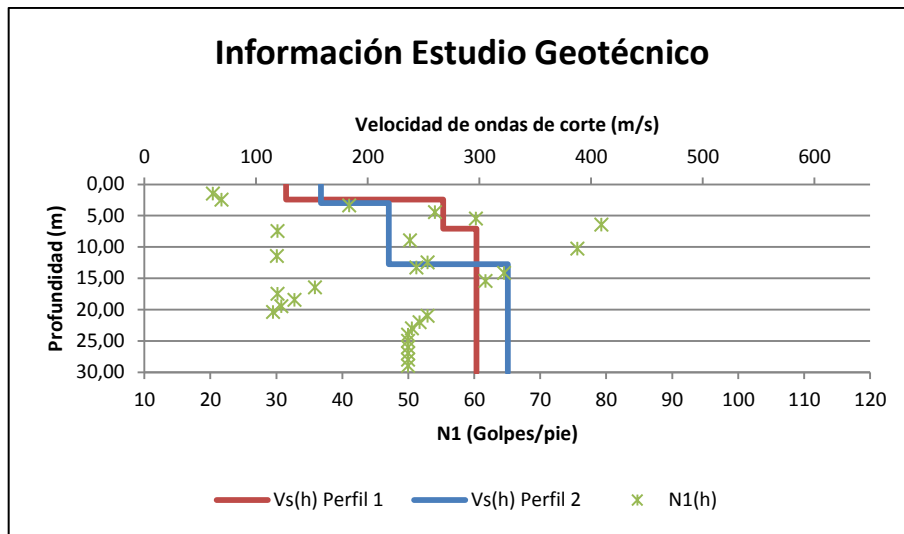


Ilustración 3-2: “Información Campaña de terreno, *Estudio de Caso 2*”

Fuente: Elaboración propia.

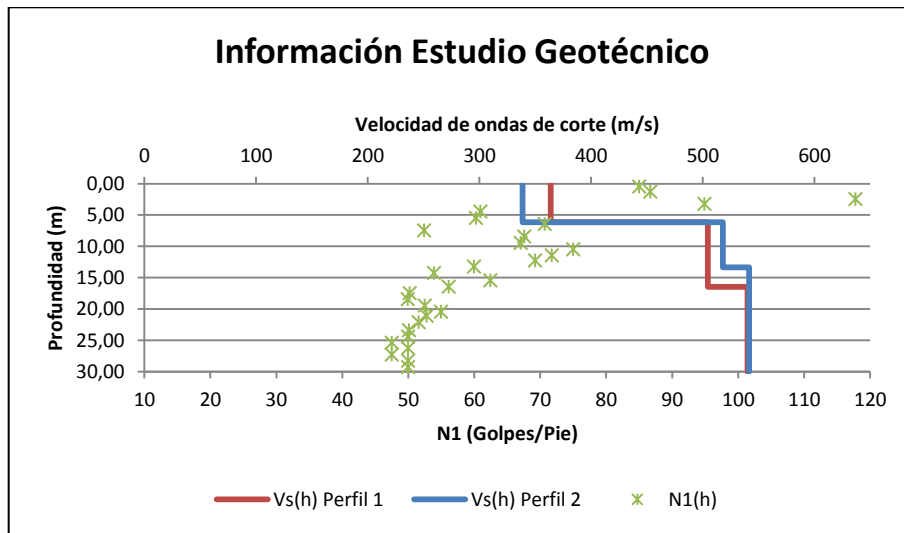


Ilustración 3-3: “Información Campaña de terreno, *Estudio de Caso 3*”

Fuente: Elaboración propia.

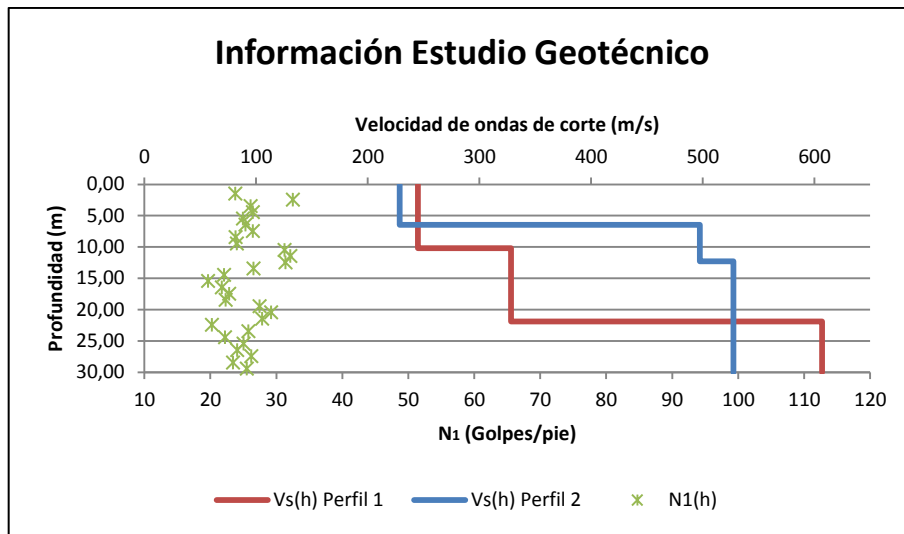


Ilustración 3-4: “Información Campaña de terreno, *Estudio de Caso 4*”

Fuente: Elaboración propia.

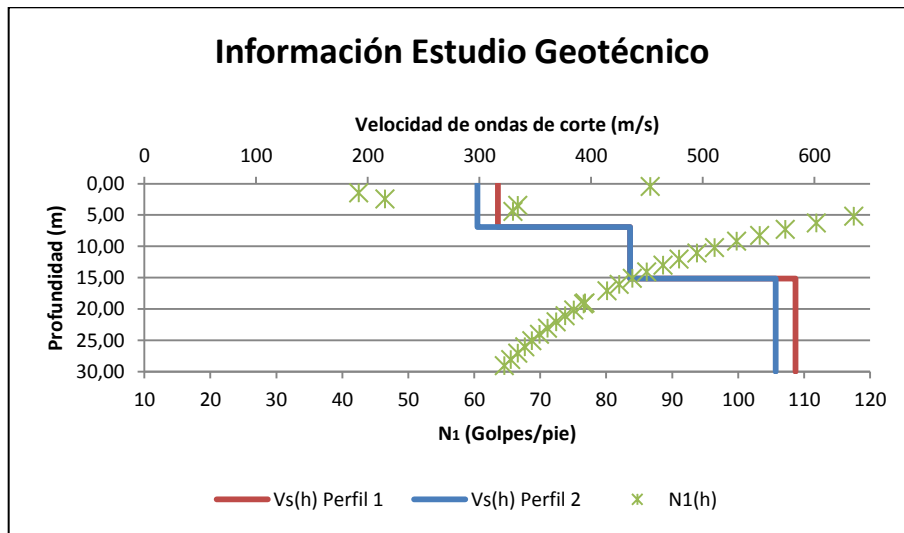


Ilustración 3-5: “Información Campaña de terreno, *Estudio de Caso 5*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-1: “Información Campaña de terreno para cada estudio de caso”

Fuente: Elaboración propia

Estudio de Caso	Tipo de suelo	Vs30 (m/s)		Nivel Freático ¹¹ (m)	Nivel Freático ¹² (m)	N ₁ (Golpes/pie)
		Perfil 1	Perfil 2			
1	Arena	286,69	314,99	-	4,50	>30
2	Arena Limosa	264,44	257,46	-	-	>20
3	Arena Limosa	480,83	477,82	-	-	>40
4	Arena	331,18	407,93	-	6,00	>20
5	Arena cementada	353,04	438,89	5,90	3,50	>40

3.2 Correlaciones empíricas seleccionadas

En el presente apartado se presentan las ecuaciones seleccionadas para el desarrollo del estudio, si se requiere obtener mayor información de correlaciones con otros modelos matemáticos u otros tipos de suelo se debe consultar el Anexo B.

Tabla 3-2: “Selección de ecuaciones empíricas”

Fuente: Elaboración propia

e ⁰	Autor	Año	Relación	A	b
1	Shibata	1970	$V_s = 32,00 \cdot N^{0,500}$	32,00	0,500
2	Ohta et al.	1972	$V_s = 87,00 \cdot N^{0,360}$	87,00	0,360
3	Ohsaki y Iwasaki	1973	$V_s = 59,00 \cdot N^{0,470}$	59,00	0,470
4	Imai	1977	$V_s = 97,20 \cdot N^{0,323}$	97,20	0,323
5			$V_s = 80,60 \cdot N^{0,331}$	80,60	0,331

¹¹ Nivel freático detectado en la campaña de exploraciones manuales.

¹² Nivel freático detectado durante la ejecución del sondajes geotécnico.

e ^o	Autor	Año	Relación	A	b
6	Ohta y Goto	1978	$V_s = 90,10 \cdot N^{0,337}$	90,10	0,337
7			$V_s = 81,30 \cdot N^{0,337}$	81,30	0,337
8			$V_s = 80,10 \cdot N^{0,337}$	80,10	0,337
9			$V_s = 98,30 \cdot N^{0,250}$	98,30	0,250
10			$V_s = 94,30 \cdot N^{0,250}$	94,30	0,250
11			$V_s = 96,70 \cdot N^{0,250}$	96,70	0,250
12			$V_s = 142,40 \cdot N^{0,250}$	142,40	0,250
13			$V_s = 135,60 \cdot N^{0,250}$	135,60	0,250
14			$V_s = 140,10 \cdot N^{0,250}$	149,10	0,250
15	JRA	1980	$V_s = 80,00 \cdot N^{0,333}$	80,00	0,333
16	Imai y Tonouchi	1982	$V_s = 87,80 \cdot N^{0,314}$	87,80	0,314
17	Seed et al.	1983	$V_s = 56,40 \cdot N^{0,500}$	56,40	0,500
18	Sykora e Stokoe	1983	$V_s = 100,50 \cdot N^{0,290}$	100,50	0,290
19	Okamoto et al.	1989	$V_s = 125,00 \cdot N^{0,300}$	125,00	0,300
20	Lee	1990	$V_s = 57,40 \cdot N^{0,490}$	57,40	0,490
21	Lee	1992	$V_s = 104,70 \cdot N^{0,296}$	104,70	0,296
22	Pitilakis et al.	1992	$V_s = 162,00 \cdot N^{0,170}$	162,00	0,170
23	Kalteziotis et al	1992	$V_s = 49,10 \cdot N^{0,500}$	49,10	0,500
24	Athansopoulos	1994	$V_s = 85,30 \cdot N^{0,420}$	85,30	0,420
25	Dickenson*	1994	$V_s = 100,21 \cdot N^{0,266}$	100,21	0,266
26	Raptakis et al.	1995	$V_s = 123,00 \cdot N^{0,290}$	123,00	0,290
27			$V_s = 100,00 \cdot N^{0,240}$	100,00	0,240
28	Pitilakis	1999	$V_s = 145,00 \cdot N^{0,178}$	145,00	0,178
28	Chien et al.	2000	$V_s = 22,00 \cdot N^{0,760}$	22,00	0,760
30	Hansancebi y Ulusay	2007	$V_s = 90,80 \cdot N^{0,319}$	90,80	0,319
31	Lee y Tsai	2008	$V_s = 98,70 \cdot N^{0,305}$	98,70	0,305
32			$V_s = 128,28 \cdot N^{0,241}$	128,28	0,241
33	Hanumantharao y Ramana	2008	$V_s = 79,00 \cdot N^{0,434}$	79,00	0,434
34			$V_s = 86,00 \cdot N^{0,420}$	86,00	0,420
35	Dikmen	2009	$V_s = 73,00 \cdot N^{0,330}$	73,00	0,330
36	Maheswari et al	2010	$V_s = 100,53 \cdot N^{0,265}$	100,53	0,265
37	Thaker y Rao	2011	$V_s = 59,72 \cdot N^{0,420}$	59,72	0,420
38			$V_s = 51,21 \cdot N^{0,450}$	51,21	0,450
39	Tsiambaos y Sabatakakis	2011	$V_s = 79,70 \cdot N^{0,365}$	79,70	0,365



e°	Autor	Año	Relación	A	b
40	Akin, Kramer y Topal	2011	$V_s = 56,15 \cdot N^{0,441}$	56,15	0,441
41			$V_s = 42,23 \cdot N^{0,474}$	42,23	0,474
42	Anbazhagan et al	2012	$V_s = 60,17 \cdot N^{0,560}$	60,17	0,560
43	Marto A. et al	2013	$V_s = 66,56 \cdot N^{0,420}$	66,56	0,420
44	Pietrantonio et al	2013	$V_s = 121,17 \cdot N^{0,251}$	121,17	0,251
45	Fabbrocino et al	2014	$V_s = 149,30 \cdot N^{0,192}$	149,30	0,192

A continuación se presenta un gráfico con las ecuaciones presentadas en la Tabla 3-2 y posteriormente uno con el promedio de las ecuaciones.

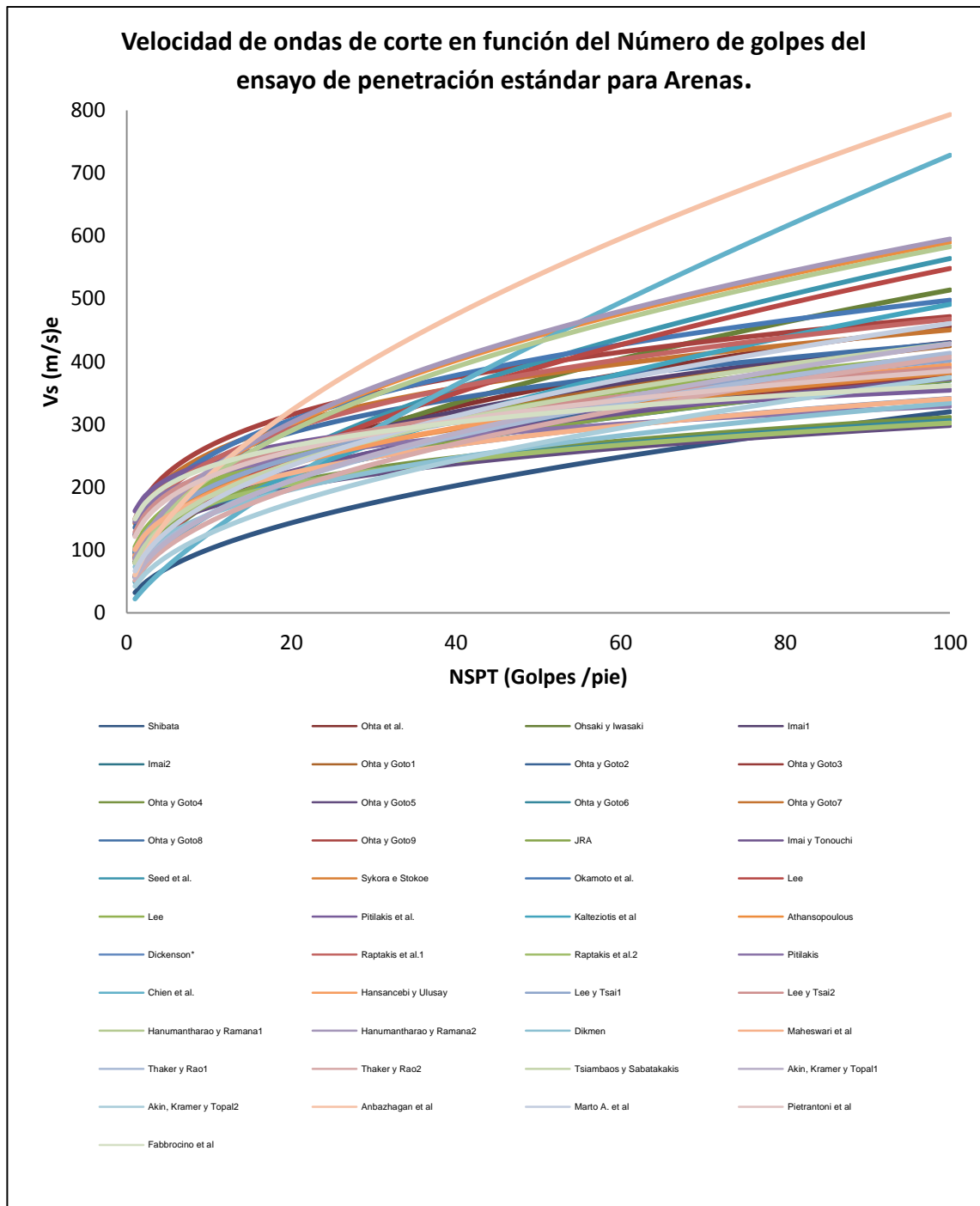


Ilustración 3-6: “Ecuaciones aplicables para Arena”

Fuente: Elaboración propia a partir de Tabla 3-2.

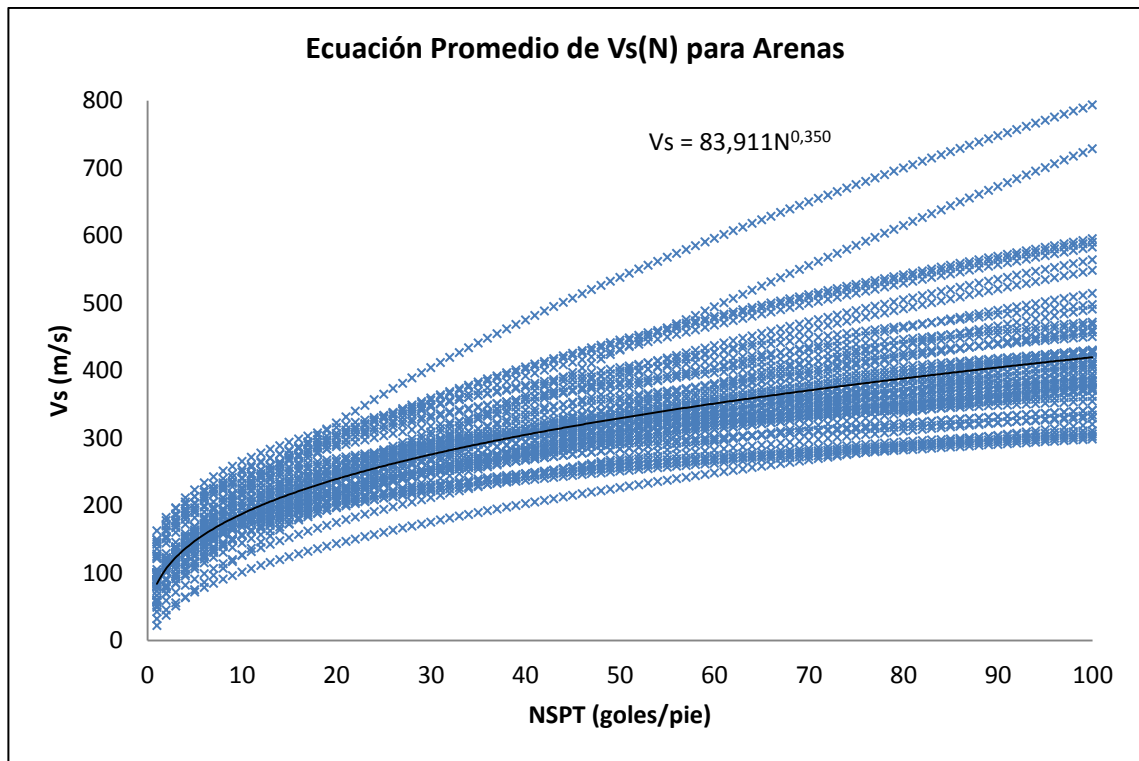


Ilustración 3-7: “Ecuación promedio para Arenas”

Fuente: Elaboración propia a partir de Tabla 3-2.

3.3 Estimación de NSPT en función de Vs

A partir de las ecuaciones seleccionadas en el punto 3.2 se presenta el pre-dimensionamiento del Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar para cada uno de los estudios de caso, presentando un gráfico con la estimación de N_1 para cada perfil de velocidad de ondas de corte y una tabla resumen con el promedio y la desviación estándar para cada intervalo.

A continuación se presenta la estimación de N_{spt} en función del perfil de Vs del estudio de caso 1.

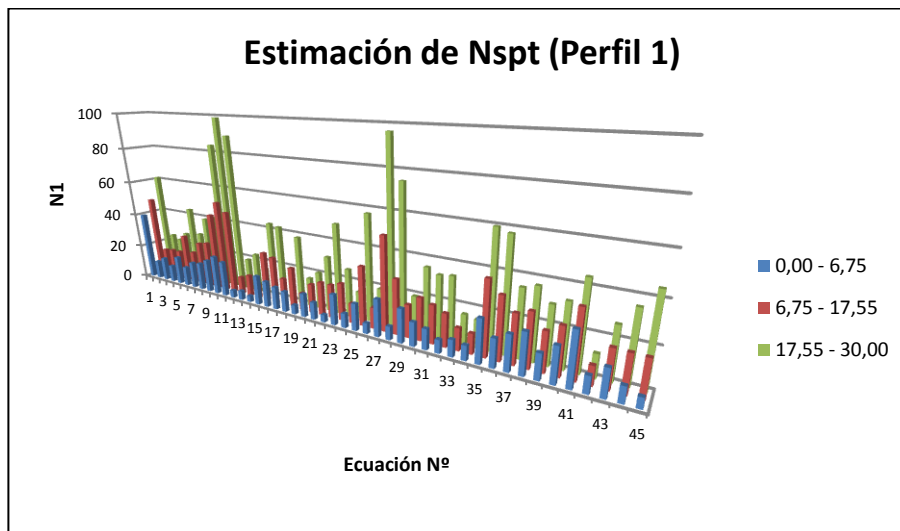


Ilustración 3-8: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), *Estudio de Caso 1*”

Fuente: Elaboración propia.

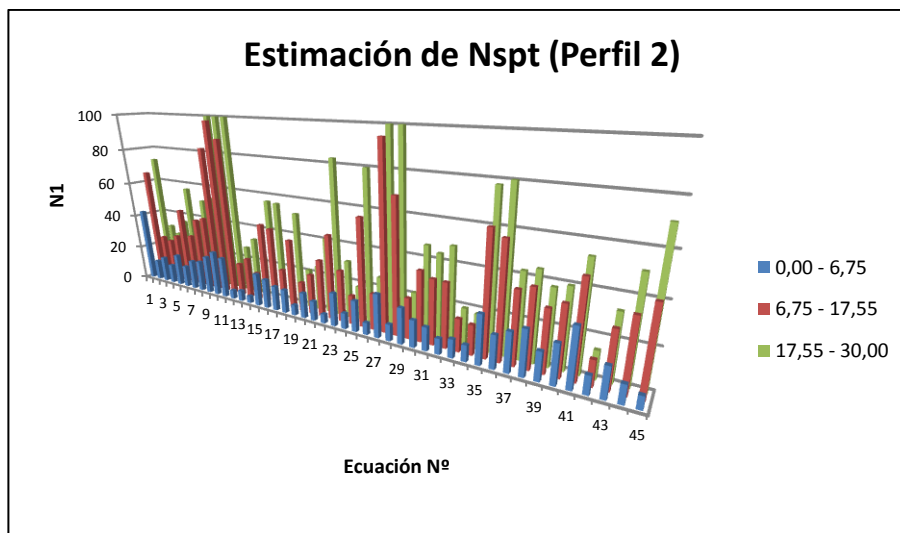


Ilustración 3-9: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), *Estudio de Caso 1*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. *Estudio de caso 1*”

Fuente: Elaboración propia

	Estimación N_1 (Perfil 1)			Estimación N_1 (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 6,75	6,75 - 17,55	17,55 - 30,00	0,00 - 6,75	6,75 - 17,55	17,55 - 30,00
Promedio	13	23	38	15	39	52
Desviación Estándar	7	11	22	8	22	33

A continuación se presenta la estimación de N_{spt} en función del perfil de Vs del estudio de caso 2.

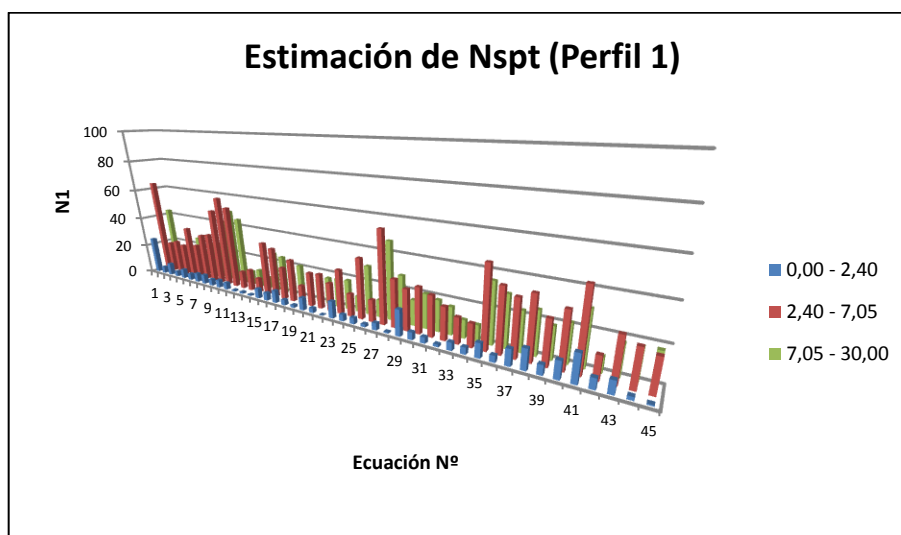


Ilustración 3-10: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), *Estudio de Caso 2*”

Fuente: Elaboración propia.

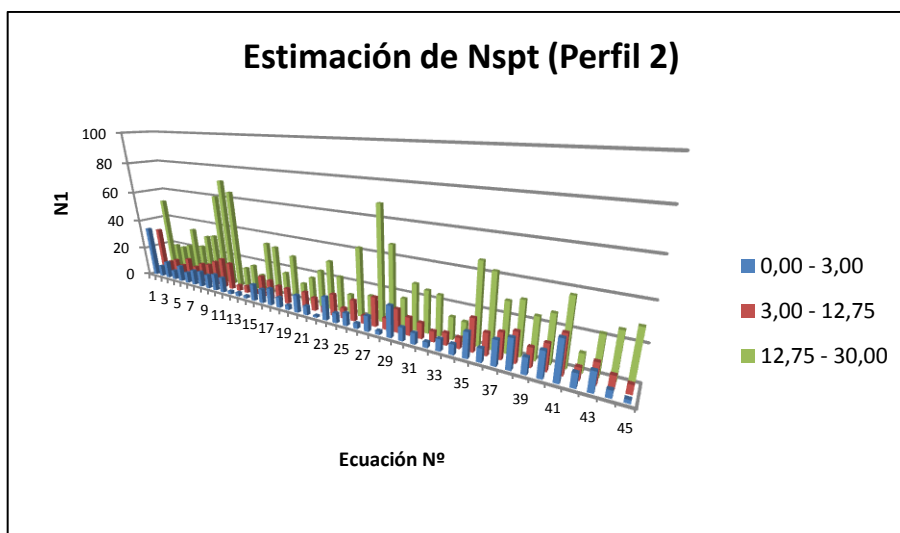


Ilustración 3-11: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), *Estudio de Caso 2*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-4: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. *Estudio de caso 2*”

Fuente: Elaboración propia

	Estimación N1 (Perfil 1)			Estimación N1 (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 2,40	2,40 - 7,05	7,05 - 30,00	0,00 - 3,00	3,00 - 12,75	12,75 - 30,00
Promedio	6	28	22	9	11	29
Desviación Estándar	5	13	11	6	6	15

A continuación se presenta la estimación de N_{spt} en función del perfil de Vs del estudio de caso 3.

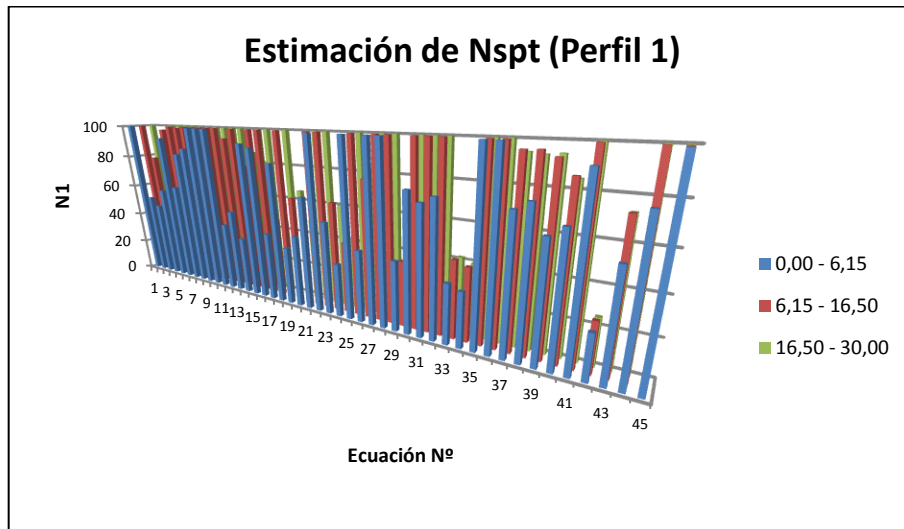


Ilustración 3-12: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), *Estudio de Caso 3*”

Fuente: Elaboración propia.

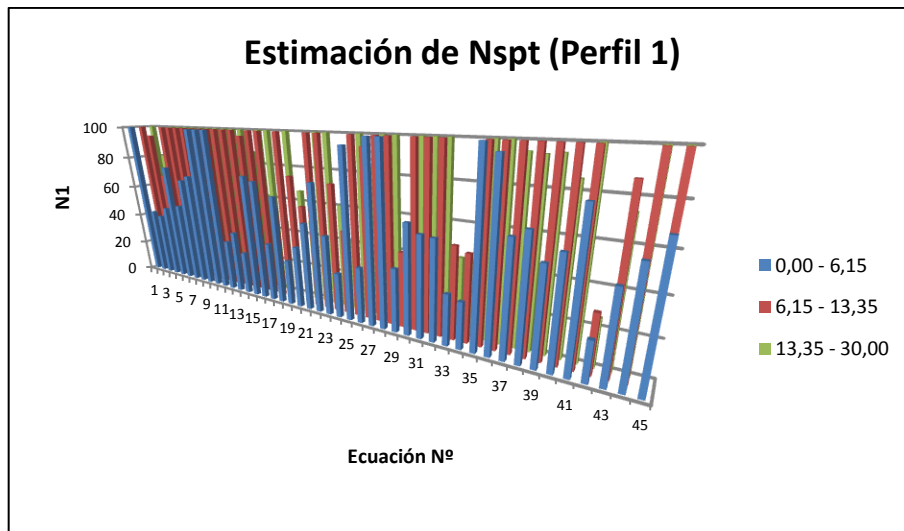


Ilustración 3-13: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), *Estudio de Caso 3*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-5: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. *Estudio de caso 3*”

Fuente: Elaboración propia

	Estimación N1 (Perfil 1)			Estimación N1 (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 6,15	6,15 - 16,50	16,50 - 30,00	0,00 - 6,15	6,15 - 13,35	13,35 - 30,00
Promedio	83	167	182	65	205	184
Desviación Estándar	49	149	177	36	189	180

A continuación se presenta la estimación de N_{spt} en función del perfil de Vs del estudio de caso 4.

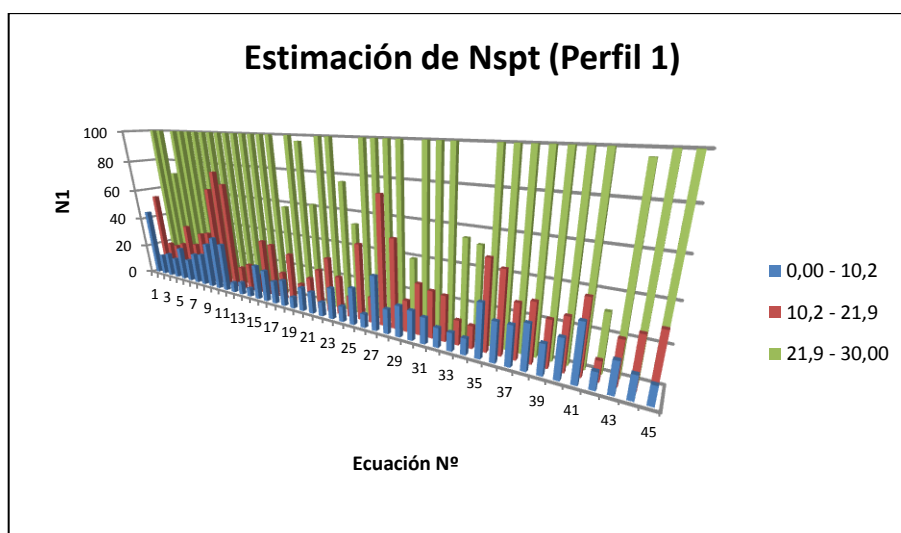


Ilustración 3-14: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), *Estudio de Caso 4*”

Fuente: Elaboración propia.

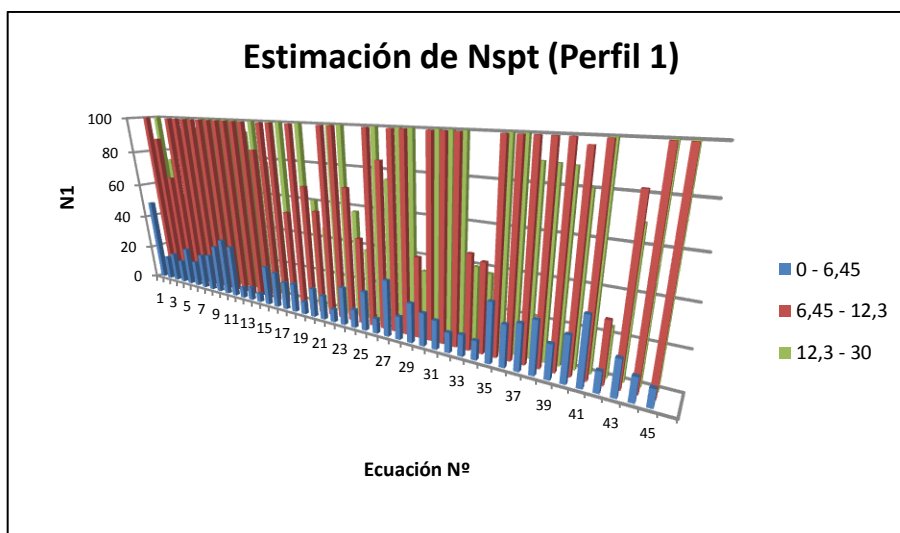


Ilustración 3-15: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), *Estudio de Caso 4*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-6: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. *Estudio de caso 4*”

Fuente: Elaboración propia

	Estimación N1 (Perfil 1)			Estimación N1 (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 10,2	10,2 - 21,9	21,9 - 30,00	0 - 6,45	6,45 - 12,3	12,3 – 30,00
Promedio	18	31	289	18	183	165
Desviación Estándar	8	17	328	9	160	156

A continuación se presenta la estimación de N_{spt} en función del perfil de Vs del estudio de caso 5.

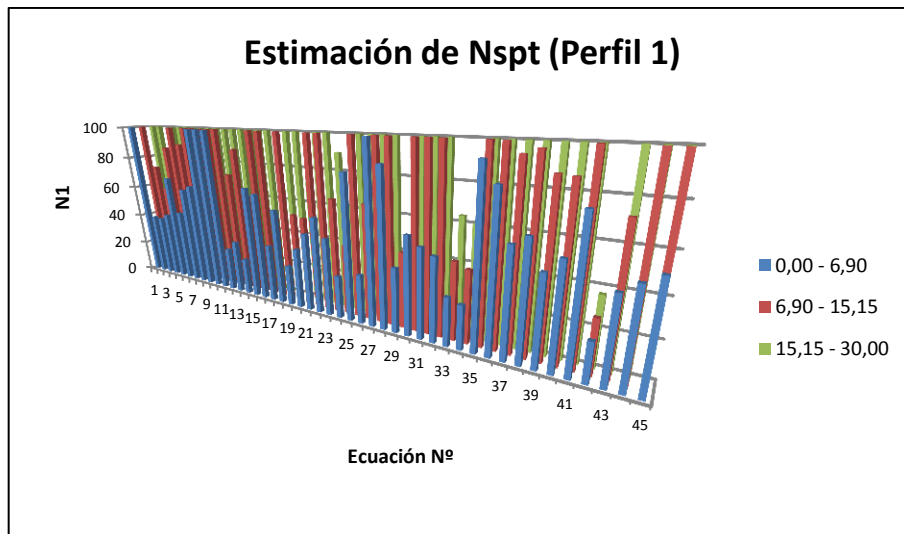


Ilustración 3-16: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 1), *Estudio de Caso 5*”

Fuente: Elaboración propia.

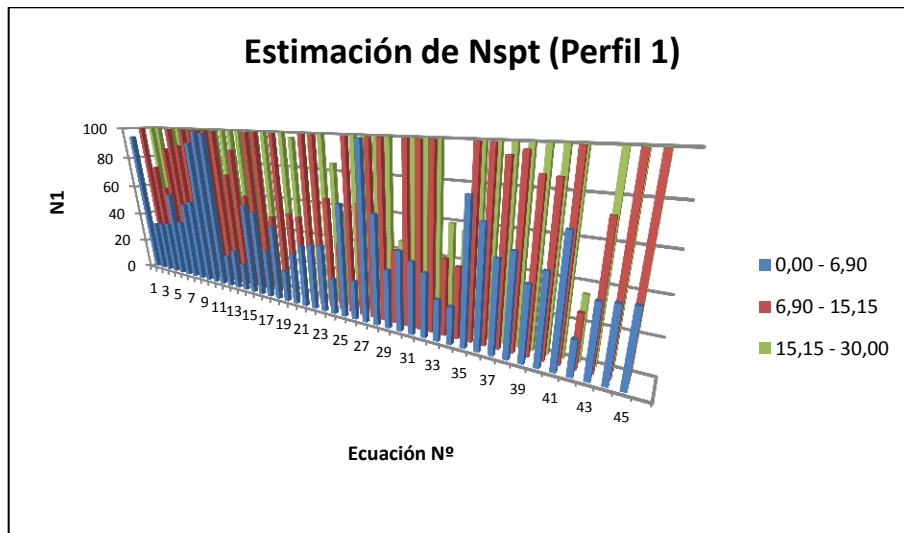


Ilustración 3-17: “Estimación de N_{SPT} (Perfil 2), *Estudio de Caso 5*”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-7: “Promedio y desviación estándar de N_{spt} por intervalo de profundidad. *Estudio de caso 5*”

Fuente: Elaboración propia

	Estimación N_1 (Perfil 1)			Estimación N_1 (Perfil 2)		
$h(m)$	0,00 - 6,90	6,90 - 15,15	15,15 - 30,00	0,00 - 6,90	6,90 - 15,15	15,15 - 30,00
Promedio	58	134	313	48	134	277
Desviación Estándar	30	99	338	24	99	287

3.4 Clasificación Sísmica de los Estudios de Caso

3.4.1 Clasificación Sísmica Directa

Para cada estudio de caso se presenta la Clasificación Sísmica Directa en función de ambos perfiles de velocidad de onda de corte de los primeros 30 m.

Tabla 3-8: “Clasificación Sísmica Directa para cada estudio de Caso”

Fuente: Elaboración propia

Estudio de Caso	Perfil 1	Perfil 2	Criterio	Clasificación Sísmica Directa
	V _{S30} (m/s)			
1	286,69	314,99	V _{S30} >180(m/s)	Suelo Tipo E
2	264,44	257,46	V _{S30} >180(m/s)	Suelo Tipo E
3	480,83	477,82	V _{S30} >350(m/s)	Suelo Tipo D
4	331,18	407,93	V _{S30} >180(m/s)	Suelo Tipo E
5	353,04	438,89	V _{S30} >350(m/s)	Suelo Tipo D

3.4.2 Clasificación Sísmica Completa

Para cada estudio de caso se presenta la Clasificación Sísmica Completa en función de ambos perfiles de velocidad de onda de corte de los primeros 30 m y del resultado de los ensayos de penetración estándar a partir de la ejecución del Sondaje Geotécnico.

Tabla 3-9: “Clasificación Sísmica Completa para cada estudio de Caso”

Fuente: Elaboración propia

Estudio de Caso	Perfil 1	Perfil 2	Criterio		Clasificación Sísmica Completa
	V_{S30} (m/s)		V_{S30} (m/s)	N_1 (Golpes/Pie)	
1	286,69	314,99	>180	>30	Suelo Tipo D
2	264,44	257,46	>180	>30 ¹³	Suelo Tipo D
3	480,83	477,82	>350	>40	Suelo Tipo C
4	331,18	407,93	>180	>20	Suelo Tipo E
5	353,04	438,89	>350	>40	Suelo Tipo C

3.4.3 Clasificación Sísmica Preliminar

A continuación se presenta la probabilidad de éxito por intervalos en cada uno de los perfiles de velocidad de ondas de corte de los estudios de caso.

Tabla 3-10: “Probabilidad de éxito por intervalo *Estudio de Caso 1*”

Fuente: Elaboración propia

	Probabilidad de éxito (Perfil 1)			Probabilidad de éxito (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 6,75	6,75 - 17,55	17,55 - 30,00	0,00 - 6,75	6,75 - 17,55	17,55 - 30,00
P(N>30)	0,84%	28,22%	64,91%	2,20%	66,28%	74,87%

Según la probabilidad de éxito se define la clasificación sísmica como Suelo Tipo E.

Tabla 3-11: “Probabilidad de éxito por intervalo *Estudio de Caso 2*”

Fuente: Elaboración propia.

	Probabilidad de éxito (Perfil 1)			Probabilidad de éxito (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 2,40	2,40 - 7,05	7,05 - 30,00	0,00 - 3,00	3,00 - 12,75	12,75 - 30,00
P(N>30)	0,00%	44,44%	21,51%	0,03%	0,05%	47,56%

¹³ Existen 2 valores entre 20 y 29 (Golpes /pie), pero la normativa permite esta situación para suelo tipo D, siempre que no sea para más de 5 de los 30 m de la exploración.

Según la probabilidad de éxito se define la clasificación sísmica como Suelo Tipo E.

Tabla 3-12: “Probabilidad de éxito por intervalo *Estudio de Caso 3*”

Fuente: Elaboración propia

	Probabilidad de éxito (Perfil 1)			Probabilidad de éxito (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 6,15	6,15 - 16,50	16,50 - 30,00	0,00 - 6,15	6,15 - 13,35	13,35 - 30,00
P(N>40)	80,89%	80,27%	78,78%	75,78%	80,82%	78,77%

Según la probabilidad de éxito se define la clasificación sísmica como Suelo Tipo C.

Tabla 3-13: “Probabilidad de éxito por intervalo *Estudio de Caso 4*”

Fuente: Elaboración propia

	Probabilidad de éxito (Perfil 1)			Probabilidad de éxito (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 10,2	10,2 - 21,9	21,9 - 30,00	0 - 6,45	6,45 - 12,3	12,3 - 30
P(N>30)	7,44%	52,54%	78,50%	8,79%	83,00%	80,66%

Según la probabilidad de éxito se define la clasificación sísmica como Suelo Tipo E.

Tabla 3-14: “Probabilidad de éxito por intervalo *Estudio de Caso 5*”

Fuente: Elaboración propia

	Probabilidad de éxito (Perfil 1)			Probabilidad de éxito (Perfil 2)		
h(m)	0,00 - 6,90	6,90 - 15,15	15,15 - 30,00	0,00 - 6,90	6,90 - 15,15	15,15 - 30,00
P(N>40)	72,30%	83,00%	79,08%	62,47%	83,00%	79,57%

Según la probabilidad de éxito se define la clasificación sísmica como Suelo Tipo C.

A partir de las tablas 3-10 a 3-14 se presenta un resumen de la clasificación sísmica preliminar para cada estudio de caso:

Tabla 3-15: “Clasificación Sísmica Preliminar para cada estudio de Caso”

Fuente: Elaboración propia

Estudio de Caso	Criterio		Clasificación Sísmica
	V_{s30} (m/s)	p %	
1	>180	<50%	Suelo Tipo E
2	>180	<50%	Suelo Tipo E
3	>350	>50%	Suelo Tipo C
4	>180	<50%	Suelo Tipo E
5	>350	>50%	Suelo Tipo C

3.5 Resumen de Resultados

Se obtuvieron 45 ecuaciones a partir de la bibliografía, mediante las cuales se estimó el Número de golpes del ensayo de penetración estándar para 5 estudios de caso, obteniendo las tres clasificaciones sísmicas para cada uno de ellos según lo definido en la metodología. A continuación se presenta un resumen de las clasificaciones sísmicas.

Estudio de caso 1:

- La Clasificación Sísmicas Directa corresponde a Suelo Tipo E.
- Por su lado la Clasificación Sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo E.
- Finalmente la Clasificación Sísmica Completa mejora el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo D.

Estudio de caso 2:

- La Clasificación Sísmicas Directa corresponde a Suelo Tipo E.
- Por su lado la Clasificación Sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo E.
- Finalmente la Clasificación Sísmica Completa mejora el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo D.

Estudio de caso 3:

- La Clasificación Sísmicas Directa corresponde a Suelo Tipo D.
- Por su lado la Clasificación Sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo C.
- Finalmente la Clasificación Sísmica Completa mejora el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo C.

Estudio de caso 4:

- La Clasificación Sísmicas Directa corresponde a Suelo Tipo E.
- Por su lado la Clasificación Sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo E.
- Finalmente la Clasificación Sísmica Completa ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo E.

Estudio de caso 5:

- La Clasificación Sísmica Directa corresponde a Suelo Tipo D.
- Por su lado la Clasificación Sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje ratifica el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo C.
- Finalmente la Clasificación Sísmica Completa mejora el resultado de la Clasificación Sísmica Directa, es decir Suelo tipo C.

Tabla 3-16: “Resumen de resultados de la clasificación Sísmica”

Fuente: Elaboración propia

Estudio de Caso	Clasificación Sísmica			Comportamiento de la clasificación Preliminar Respecto de la clasificación completa
	Directa	Preliminar	Completa	
1	Suelo Tipo E	Suelo Tipo E	Suelo Tipo D	Difiere
2	Suelo Tipo E	Suelo Tipo E	Suelo Tipo D	Difiere
3	Suelo Tipo D	Suelo Tipo C	Suelo Tipo C	Coincide
4	Suelo Tipo E	Suelo Tipo E	Suelo Tipo E	Coincide
5	Suelo Tipo D	Suelo Tipo C	Suelo Tipo C	Coincide

4 Discusión y análisis de resultados.

En el presente capítulo se realizará un análisis de resultados incluyendo la identificación de las principales fuentes de error y un análisis global de las distintas clasificaciones sísmicas en cada estudio de caso.

4.1 Principales fuentes de error.

La revisión Bibliográfica realizada consideró 21 estudios referentes a la correlación entre la velocidad de ondas de corte y el Número de golpes del ensayo de penetración estándar, entre los cuales se citan otros estudios y sus respectivas ecuaciones, a pesar que no siempre se logró encontrar el estudio en referencia las ecuaciones se consideraron como parte de esta investigación, en caso de querer utilizar alguna ecuación citada en el presente estudio se recomienda buscar el documento de respaldo.

Existe una gran variedad de factores influyentes¹⁴ en el resultado de las correlaciones entre la velocidad de ondas de corte y el Número de golpes del ensayo de penetración estándar, al realizar la selección de ecuaciones sólo se definieron dos criterios, intentando representar la mayor cantidad de tipos de arena, indistintamente de su origen geomorfológico, contenido de finos, entre otros.

El primer criterio está asociado al tipo de suelo, es decir que sean aplicables a suelos arenosos, ya que esta investigación sólo considera la clasificación sísmica de arenas. Por otra parte, el segundo criterio el modelo matemático, ya que el modelo seleccionado sólo incluye las variables en cuestión (V_s y N_{spt})

¹⁴ Para entender cómo afecta cada factor en el resultado de las ecuaciones se recomienda consultar el Anexo A, en el cual presenta un análisis crítico de las distintas investigaciones, analizando uno por uno los factores que influyen en la correlación resultante, entre ellos el modelo matemático, las correcciones de N_{spt} , la edad geológica, el tipo de suelo, la profundidad del ensayo y el contenido de finos.

para la correlación y es el de uso más extensivo entre las investigaciones consultadas.

Las correlaciones entre N_{spt} y V_s que se utilizaron en el estudio, son una fuente de error por si mismas, considerando los siguientes factores:

- El método para determinar V_s difiere de una investigación a otra.
- Aunque el ensayo de penetración es “estandarizado”, existen factores de error asociados al mismo, de los cuales se destaca la eficiencia energética del ensayo, ya que varía en cada investigación y sólo algunos autores se ocupan de este asunto.
- El número de datos utilizados para determinar la correlación varia de caso en caso y por lo mismo los valores de R^2 de cada correlación presentan una gran variabilidad¹⁵.

La principal fuente de error asociada a la metodología definida para la Clasificación Preliminar es la corrección por presión de confinamiento, ya que al momento de estimar N_1 a partir de las correlaciones, la ejecución de calicatas no siempre permite determinar el nivel freático y la presión vertical efectiva se ve fuertemente influenciada por la presencia de napa freática.

Se debe tener en cuenta que el método para obtener la velocidad de ondas de corte en los estudios de caso es la Refracción de Microtremores. Aunque este método es aceptado por la Normativa Chilena, no es el de mayor precisión, incluso comparándolo con otros métodos geofísicos, como se puede apreciar en Garcia et al (2008) y Veronese y Garbari (2004), esto influye en la estimación de N_1 y por tanto en la Clasificación sísmica Preliminar.

¹⁵ Cuando se contó con la información, se presenta el valor de R^2 , el número de datos de la muestra y el método para determinar la velocidad de ondas S, para mayor detalle consultar Anexo B.

4.2 Análisis Global de los estudios de caso.

Para comenzar el análisis de resultados se utiliza la Tabla 3-16, donde se identifica cómo se comporta la clasificación sísmica preliminar respecto de la clasificación Completa. En ella se puede apreciar que en 3 de los 5 estudios de caso fue posible estimar correctamente la clasificación sísmica completa. Donde 2 de ellos corresponden a los estudios cuyo parámetro V_{s30} es superior a 350 m/s. Por otra parte, para 2 de los 3 los estudios en que V_{s30} es superior a 180 m/s, no fue posible estimar correctamente la clasificación completa.

Para analizar esta situación, se repitió la clasificación Preliminar, considerando estimaciones puntuales de N_1 a través de la ecuación promedio, la cual fue presentada en la ilustración 3-7. En tal caso el resultado de la Clasificación sísmica Preliminar no varió respecto los resultados del capítulo 3.3 en base a la estimación probabilística.

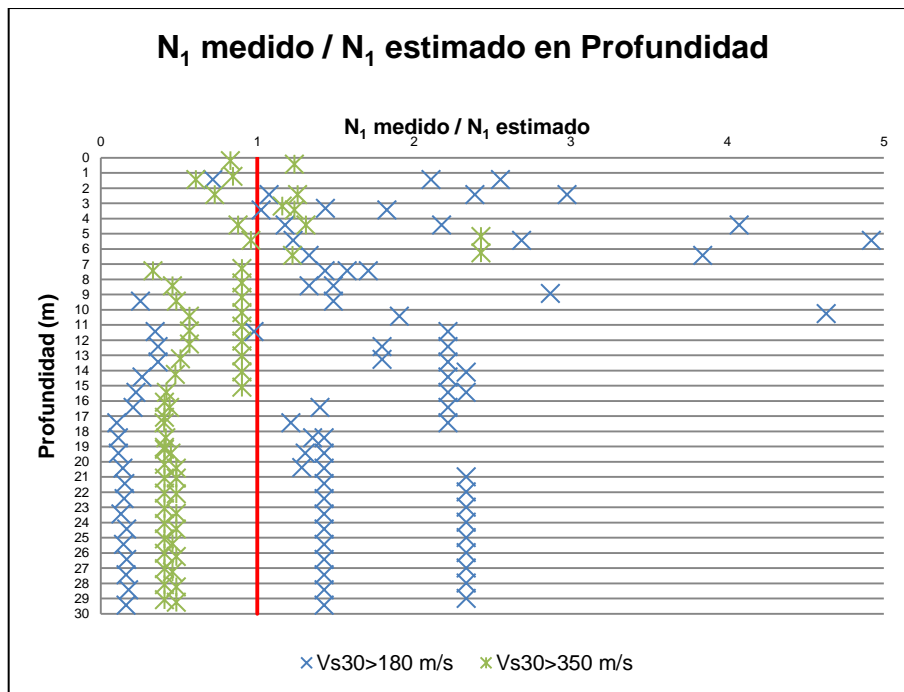


Ilustración 4-1: "Razón entre N_1 medido y N_1 estimado en profundidad"

Fuente: Elaboración propia.

Para estudiar la precisión de la estimación de N_1 se grafica la razón entre el N_1 real¹⁶ y N_1 estimado¹⁷ y su comportamiento en profundidad (Ilustración 4-1). En este se puede apreciar que existe una gran dispersión de los datos, principalmente profundidades menores a 10,00 m.

Del mismo gráfico se desprende que para los estudios de caso con V_{S30} superior a 180 m/s, el valor de N_1 es subestimado mediante la metodología propuesta, y esto se acentúa en los estratos superiores.

Por el contrario, en los estudios de caso con V_{S30} superior a 350 m/s observa una buena estimación de N_1 , aunque en los estrato más profundos se sobreestima este parámetro.

4.3 Discusión General

Para obtener una mejor estimación de N_1 es posible desarrollar una correlación entre la velocidad de ondas de corte y el Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar en base a datos de campo tomados en Chile o que apliquen a un sitio específico a estudiar. Esta alternativa se descartó en la presente investigación dada la escasa cantidad de datos disponibles.

Aunque el D.S. N°61 sólo exige la corrección por presión de confinamiento para la clasificación sísmica, otra forma de disminuir la dispersión de los datos es corrigiendo los valores de N por Energía, largo de varillaje, diámetro de la perforación, entre otros. En la presente investigación no se realizaron estas correcciones ya que los estudios de caso no contaban con dicha información.

Un posible resultado que no se presentó en los casos estudiados es cuando la Clasificación sísmica Preliminar estima que la ejecución del sondaje mejorará a

¹⁶ Medido en terreno y corregido por presión de confinamiento.

¹⁷ Estimado a partir del perfil de velocidad de ondas de corte y corregido por presión de confinamiento.

Clasificación Directa, y por el contrario la Clasificación Completa ratifica el resultado inicial, esto se puede producir por distintas situaciones, por ejemplo un lente de arena de baja compacidad a una profundidad media podría generar esta situación, ya que los métodos geofísicos no necesariamente identifican este tipo de singularidades en el subsuelo.

En los registros de la empresa que facilitó los datos para esta investigación, no se encontraron casos con V_{s30} superior a 500 m/s en suelos arenosos, pero al analizar la ilustración 3-6 y 3-7, se puede ver con claridad que se trata de funciones crecientes, por tanto a mayor velocidad de ondas de corte mayor es el número de golpes del ensayo de penetración estándar. Por el contrario la relación inversa no se puede asegurar, ya que un arena cementada de alta porosidad, puede presentar un valor elevado de N_1 y bajas velocidades de ondas de corte.

5 Conclusiones.

Teniendo en cuenta la cantidad de estudios de caso, no es posible concluir con certeza absoluta respecto de la concordancia entre la Clasificación Sísmica Preliminar y la Clasificación Sísmica Completa. Aun así, la Clasificación Sísmica Preliminar definida en el cuerpo del estudio debe ser considerada como una herramienta útil para un Ingeniero experimentado en geotecnia, que junto a otros antecedentes, entrega una aproximación de los posibles resultados de la Clasificación Sísmica Completa.

Es importante tener en consideración que suelos con elevadas velocidades de onda de corte se asocian a altas probabilidades de éxito, en tal caso se recomienda la ejecución del sondaje geotécnico, esperando una mejora en la Clasificación Sísmica. Por el contrario suelos con velocidades menores se asocian a bajas probabilidades de éxito, en consecuencia a bajos valores de N_{spt} , en tal caso la ejecución del sondaje también es recomendable, ya que es necesario descartar la presencia de suelos licuables (arenas con valores de N_{spt} inferiores a 20 golpes/pie).

Cuando la probabilidad de éxito es cercana al 50% se considera que la metodología definida no tiene suficiente precisión para discernir respecto de la ejecución del sondaje.

De cualquier forma esta investigación sienta un precedente para futuras investigaciones alusivas a este tema, tales como obtener mayor precisión en la estimación de N_{spt} , ya sea reduciendo la fuentes de error analizadas anteriormente, o bien obteniendo correlaciones empíricas en base a suelos chilenos.

6 Bibliografía

Akin, M.K., Kramer, S.L., Topal, T., 2011. "Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey)". Eng. Geol. 119, 1–17.

Alfaro A., 2007. "Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de corte para Arcillas de Bogotá - Colombia". Revista Épsilon N°8, 13-23.

ASTM D1586-08a, "Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils"

Decreto Supremo N°61, (V. y U.) de 2011. Reglamento que fija el Diseño Sísmico de Edificios.

Dikmen, U. (2009) "Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils", Journal of Geophysics and Engineering, 6(1), 61–72.

Fabbrocino S., Lanzano G., Forte G., Santucci de Magistris F., Fabbrocino G., 2015. "SPT blow count vs. Shear Wave velocity relationship in the structurally complex formations of the Molise Region (Italy)". Eng. Geol. 187, 84-97.

Garcia-Mayordomo, J., Perez Satisteban, I., Patín, V., Muñoz Martín, A., Carbó, A., 2008. "Comparación entre las técnicas AEOS Re-Mi y PS-logging aplicadas en un terreno de estructura profunda conocida". Geo-Temas 10, 2008 (ISSN: 1567-5172)

Hamumantharao, C. and Ramana, G. (2008) "Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India", Journal of Earth System Science, 117 (S2), 719-730.

Hasancebi N., Ulusay R., "Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments", Bull.Eng.Geol. Environ, 66 (2006) 203-3.

Jafari, M, Shafiee, A. and Ramzkhah, A. (2002) "Dynamic properties of the fine grained soils in South of Tehran", Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4(1), 25–35.

Kalantari, F., Mola-Abasi, H., Salahi, M., 2013. "Uncertainty in shear wave velocity based on Standard Penetration Test by using Error Least Square Model". Journal of Engineering Geology, Vol.6 N°2 Autumn 2012 & Winter 2013 1559-1576.

Koçkar, M.K., Akgün, H., 2008. Development of a geotechnical and geophysical database for seismic zonation of the Ankara Basin, Turkey. Environ. Geol. 55, 165–176.

Kuo, C.H., Kuo, K.W., Hsieh, H.H., Chang, T.M., Wen K.L. and Chen, C.T. (2011) "Evaluating empirical regression equations for Vs and estimating Vs 30 in northeastern Taiwan", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 431-439.

Lee, S.H.H. (1992) "Analysis of the multicollinearity of regression equations of shear wave velocities", Soils and Foundations, 32(1), 205-214.

Lee, C.T. and Tsai, B.R. (2008) "Mapping Vs30 in Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 19(6), 671–682.

Maheswari, U., Boominathan, A., Dodagoudar, G.R., 2010. "Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils". *Geotech. Geol. Eng.* 28, 119–137.

Marto A., Tan, C.S., and Leong, T.K., 2013. "Universal Correlation of shear wave velocity and Standard Penetration resistance". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering.*, 18m, 2727-2738

Marto A., Tan, C.S., Kasim, F., and Suhatri, M., 2013. "A Correlation of shear wave velocity and Standard Penetration resistance". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering.*, 18c, 463-471

NCh. 433.Of1996 Modificada en 2009. "Diseño sísmico de edificios". Instituto Nacional de Normalización.

NCh 3364.Of2014. "Geotecnia – Penetración Estándar". Instituto Nacional de Normalización.

Pietrantoni, M., Tagliaferri, A., Petrangeli, M., 2013. "Valutazione dell'affidabilità delle prove SPT per la caratterizzazione sismica dei terreni". *Rivista Italiana di Geotecnica* Gennaio-Marzo 2013.

Shooshpasha, I., Mola-Abasi, H., Jamalian, A., Dickmen, U., and Salahi, M. 2013. "Validation and application of empirical shear wave velocity models based on standard penetration test". *Comp. Meth. Civil Eng.* Vol.4 N°1(2013) 25-41

Thaker, T.P. & Rao, K.S., 2011. "Development of statistical correlations between shear wave velocity and penetration resistance using MASW technique". 14th Pan-American Conference on soil mechanics and geotechnical engineering

Ulugergerli, U. E., Uyanık, O., 2007. “Statistical correlations between seismic wave velocities and SPT blow counts and the relative density of soils”, J. Test. Eval., 35 1-5.

Veronese, L., Garbari, T., 2004. “ Esperienze di misura V_{s30} con la tecnica refraction microtremor (remi)”. Convegno La Geofisca e La Nuova Normativa Sismica, Venezia

Wair, B.R., De Jong, J.T., Shantz, T. 2012. “Guidelines for Estimation of Shear Wave Velocity Profiles”. PEER Report 2012/08.

A. CORRELACIONES EMPÍRICAS ENTRE N_{SPT} Y V_s

El Anexo A presenta un análisis crítico de los estudios anteriores que correlacionan la velocidad de onda de corte con el Número de golpes del ensayo de Penetración estándar, basándose en los textos, si están disponibles, y en documentos de otros investigadores que citan a los anteriores.

A.1 Estado del Arte y Principales Factores.

Como se mencionó anteriormente, en Chile no se tiene registro de estudios que correlacionen estadísticamente las variables de interés en esta investigación. Por el contrario, a nivel internacional, se puede encontrar estudios referentes a este tópico desde 1966 hasta 2014, con varias investigaciones entre década y década, y desarrollados en distintos países; lo cual indica que se trata de un tema de interés mundial, con un largo recorrido, y que aún se encuentra vigente.

Las investigaciones anteriores consideran distintas variables que influyen en la correlación entre la velocidad de ondas de corte y el Número de golpes del Ensayo de penetración Estándar. Los principales factores que han sido investigados en este tópico comprenden: el modelo matemático, el tipo de Suelo y la edad geológica, la profundidad de ensayo (h), el contenido de finos y correcciones de N_{spt} (energía y presión de sobrecarga).

Respecto al punto anterior, Ohta y Goto (1978) y Lee (1992) son los autores que más variables consideraron en sus respectivos estudios, variando la mayoría de los factores descritos en el párrafo anterior para obtener ecuaciones empíricas. Estos factores, se analizarán uno por uno, identificando investigaciones anteriores, describiendo las variables consideradas y sus resultados.

A.2 El Modelo Matemático.

Los dos modelos matemáticos más frecuentes, se presentan en las ecuaciones (A.1) y (A.2), estos corresponden a funciones potencia.

$$V_s = A \cdot N_{stp}^b \quad (A.1)$$

$$V_s = A \cdot N_{stp}^b h^c \quad (A.2)$$

Donde

V_s	:	Velocidad de ondas de corte.
N_{spt}	:	Numero de golpes del ensayo de penetración estándar, (Con o sin corregir, dependiendo del autor).
h	:	Profundidad del ensayo.
A, b y c	:	Constantes de ajuste de cada modelo, según corresponde.

Han sido varios los autores que desarrollaron otros modelos, por ejemplo: Kalantary et al (2013) incluyeron el contenido de finos directamente en el modelo; Shooshpasha et al (2013) utilizan una función cuadrática de N_{spt} y D ; Kuo et al (2011) consideraron funciones lineales en dos variables; mientras Lee (1990) desarrolló funciones potencia de D , funciones lineales de N_{spt} , D , o ambas, y funciones cuadráticas de N_{spt} o D . Los estudios citados comparan los modelos de las ecuaciones (A.1) y (A.2), definiendo el mejor de los ajusten en función del más alto valor de R^2 .

Cabe destacar que Kalantary et al (2013) y Shooshpasha et al (2013), utilizan herramientas matemáticas más poderosas, como la Optimización Robusta y la

Validación PSO respectivamente, para mejorar sus ajustes. Por otra parte, el resto de los autores citados a lo largo de este estudio, realizan el ajuste de los modelos con el clásico método de los mínimos cuadrados.

A.3 Correcciones de Nspt.

De acuerdo a Dickmen (2009) y Kalantary et al (2013), la mayoría de los estudios se enfocan en la correlación entre la velocidad de ondas de corte y valores sin corregir de Nspt. Aunque distintos autores han intentado corregir los valores de Nspt, obteniendo diversos, e incluso contradictorios, resultados.

Andrus (1994), Rollins et al (1998), y Pitilakis et al (1999) consideran directamente la corrección por energía para obtener sus ecuaciones. Mientras otros como Hasancebi y Ulusay (2007) y Maheswari et al (2010), utilizan tanto datos corregidos como no corregidos. El primero de ellos, obtuvo un peor ajuste (en términos de R^2) para los valores corregidos, mientras el segundo obtuvo una pequeña variación en su análisis estadístico, concluyendo que ambos pueden predecir Vs con la misma precisión.

La presión efectiva, como corrección del valor de Nspt, ha sido considerada por Tsai (2007), Kuo et al (2011), ambos obtuvieron el mismo resultado, una disminución de R^2 . Anteriormente Sykora y Koester (1988) concluyen que los valores corregidos por la presión efectiva no son una variable apropiada para correlacionar con Vs. Por otra parte, Branderberg (2010) considera que la presión de sobrecarga debe ser interpretada para eliminar la incertidumbre, ya que teóricamente, ni Vs ni Nspt dependen de esta variable, y Rollins et al (1998) propone considerar la presión efectiva como parte del modelo con el fin de mejorar la estimación de Vs.

Andrus et al (2006) desarrollaron correlaciones entre la velocidad de ondas de corte y Nspt corregido por energía y la presión de sobrecarga. Tsiambaos y Sabatakakis (2011) también desarrollaron este tema, indicando que el uso de $(N_1)_{60}$ entrega una peor correlación, debido a la incertidumbre relacionada con los coeficientes de corrección.

A.4 La Edad Geológica y El Tipo de Suelo.

Ohta y Goto (1978) concluyeron que las regresiones que además de considerar Nspt y D, incluyen la edad geológica y el tipo de suelo, son las que entregan un mejor valor de R^2 . Por el contrario, Sykora y Stokoe (1983) sugirieron que la edad geológica y el tipo de suelo no son parámetros importantes e la estimación de Vs, mientras Nspt es primordial en este asunto. Estas aseveraciones no se contraponen del todo, por ejemplo, Andrus et al (2009), intentando estimar la edad geológica para depósitos de suelos, concluyó que la influencia de la edad geológica, es intrínseca en la variación de Nspt.

Este tópico ha sido abordado por distintos investigadores, por ejemplo: Ohsaki e Iwasaki (1973), al separar sus datos por tipo de suelos, obtuvieron correlaciones más consistentes para suelos cohesivos que para suelos arenosos, mientras Imai (1977) obtiene el resultado opuesto. Dickmen (2009), indicó que el contenido de finos en suelos cohesivos y la gradación en suelos granulares (Excepto en gravas), no tienen

efectos significativos en la estimación de Vs. Por otra parte Thaker y Rao (2011) encontraron que el tipo de suelo tiene un pequeño efecto en la correlación.

En Turquía, Akin et al (2011) separan sus datos por tipo de suelo, diferenciándolos por depósitos Aluviales y del Plioceno, considerando ambos factores, ellos identificaron que los depósitos aluviales presentan menores valores de N_{spt} , que los del Plioceno, los cuales entregan rechazo. Mientras, Kuo et al (2011) en Taiwan, identifican que influencia de la Edad Geológica y el Tipo de suelo en el sector de Yilan es despreciable, mientras en Taipéi es notablemente significativo. Concluyendo, que esto se debe a la variedad de Edades Geológicas presentes en Taipéi (Mioceno, Plesitoceno y Holoceno), caso contrario al de Yilan, donde la mayoría del área de estudio corresponde a sedimentos del Holoceno.

En Italia Fabbrocino et al (2014) concluyen que no es suficiente considerar el tipo de suelo. Aunque obtienen una mejora en la dispersión de los datos al considerar este factor (principalmente para limos y arcillas), al incluir las características Litoestratigráficas de los complejos geolitológicos, proveen una mejora en las ecuaciones mediante un aumento considerable en R^2 . Igualmente, Pietrantonio et al (2013) obtienen mejores resultados al incluir la Edad Geológica como un factor. Esto es explicado por Fabbrocino (2014) dada la compleja Geomorfología de Italia, particularmente en la región de Molise.

A.5 La Profundidad del ensayo.

Han sido varios los investigadores que incluyen la profundidad del ensayo, entre los cuales destacan: Ohta y Goto (1978), el primero en considerar este factor; Lee (1992), que analiza el problema de la multicolinealidad; y Holzer (2005), que produjo una ecuación dependiente de la profundidad, bajo el supuesto que la corrección por presión de sobrecarga es despreciable.

Akin et al (2011) y Kuo et al (2011), Kalantary (2013), Shooshpasha et al (2013), y Pietrantonio et al (2013) mejoraron el ajuste de los datos incluyendo la profundidad en el modelo matemático, por otra parte Lee y Tsai (2008) incorporan la profundidad para estimar Vs, pero concluyen que la mejora es limitada, por tanto prefirieron descartarlo. Muy por el contrario, Iyisan (1996) obtuvo una disminución de R^2 , al incorporar la profundidad en la correlación.

Adicionalmente Lee (1990) declara que N_{spt} y D no son variables independientes y que por tanto, el modelo que considera Vs como función potencia, sólo de la profundidad, es el segundo mejor en lo que respecta a R^2 .

Ambos, Lee (1990) y Ohta y Goto (1978) encontraron que la profundidad, en vez de N_{spt} , es el parámetro clave en predecir Vs, siempre que la Edad Geológica y el Tipo de Suelo sean considerados previamente.

A.6 El contenido de Finos

Respecto de este tópico, sólo se harán comentarios de la investigación de Kalantary et al (2013), que incluye el contenido de finos en la ecuación para limitar la desventaja de utilizar el ensayo de N_{spt} en suelos cohesivos.

Este documento presenta tres modelos, los indicados en las ecuaciones A.1 y A.2, y un tercero que incluye el contenido de finos directamente, el cual se presenta a continuación.

$$V_s = A \cdot N_{stp}^b D^c FC^d \quad (A.3)$$

Donde

V_s : Velocidad de ondas de corte.
 N_{stp} : Numero de golpes del ensayo de penetración estándar, (Con o sin corregir, dependiendo del autor).
 D : Profundidad del ensayo.
 FC : Contenido de finos.

A, b, c Y d : Constantes de ajuste de cada modelo, según corresponde.

De acuerdo a la recopilación de antecedentes de ese documento, Ohta y Goto (1978) también consideró el contenido de finos en su investigación, pero no se tiene mayor información al respecto.

Aunque Kalantary et al (2013) no presentan sus ecuaciones con las constantes de ajuste, se ha destacado esta investigación por el resultado obtenido: El modelo de la ecuación (A.2) y (A.3) presentan la misma predicción a pesar que la ecuación (A.3) considera el contenido de finos.

En términos generales, dada la variabilidad de los resultados en cada uno de los tópicos mencionados anteriormente, es que la mayoría de los investigadores alusivos a este tema definen que las ecuaciones son de carácter local y que deben ser validadas antes de ser utilizadas en otro sitio.

B. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El Anexo B presenta todas las correlaciones empíricas encontradas en la bibliografía, ya sea se cuente con el documento de la investigación o haya sido citada en otro. Todas las correlaciones presentadas tienen el mismo sistema de unidades con la Velocidad de ondas de corte en m/s y el Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar en golpes/pie. En la Tabla se indican los autores el año en que se publicó, el tipo de suelo, si el modelo matemático corresponde al que aquí se consideró o no. Adicionalmente se indica la información adicional que se encuentra disponible en los distintos Documentos estudiados.

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R ²	Observación
Kanai	1966	A		Japón	A.1	$V_s = 19 \cdot N^{0,60}$			ReMi
Imai y Yoshimura	1970	A		Japón	A.1	$V_s = 76 \cdot N^{0,33}$			
Obha y Toriumi	1970	A		Japón	A.1	$V_s = 84 \cdot N^{0,31}$			Medición de ondas Rayleigh
Shibata	1970	S		Japón	A.1	$V_s = 32 \cdot N^{0,50}$			Revisión de Estudios previos
Fujiwara	1972	A			A.1	$V_s = 92.1 \cdot N^{0,337}$			
Ohta et al.	1972	S		Japón	A.1	$V_s = 87 \cdot N^{0,36}$			
Ohsaki y Iwasaki	1973	A		Japón	A.1	$V_s = 82 \cdot N^{0,39}$		0,886	Downhole
		S				$V_s = 59 \cdot N^{0,47}$			
Imai y Yoshimura	1975	A		Japón	A.1	$V_s = 92 \cdot N^{0,329}$			
Imai et al.	1975	A		Japón	A.1	$V_s = 90 \cdot N^{0,341}$			
Hamilton	1976	M			Otro	$V_s = 128 \cdot D^{0,28}$			
Campbell y Duke	1976	A		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 319 \cdot D^{0,386}$			Velocidad en FPS, D en Feet
		A				$V_s = 491 \cdot D^{0,358}$			
Imai	1977	A		Japón	A.1	$V_s = 91 \cdot N^{0,337}$	Sin corregir		
		S	Aluvial			$V_s = 80,6 \cdot N^{0,331}$			
		C				$V_s = 102 \cdot N^{0,292}$			
		S	Diluvial			$V_s = 97,2 \cdot N^{0,323}$			
		C				$V_s = 114,0 \cdot N^{0,294}$			
Fumal	1978	S		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 471 \cdot D^{0,20}$			Velocidad medida en FPS, profundidad en pies.

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R²	Observación
Ohta y Goto	1978	A	Cuaternario	Japón	A.1	$V_s = 85,3 \cdot N^{0,348}$		0,52	
			Holoceno			$V_s = 92,2 \cdot N^{0,270}$		0,61	
			Pleistoceno			$V_s = 134,2 \cdot N^{0,270}$		0,61	
		S (grano fino)	Cuaternario			$V_s = 90,1 \cdot N^{0,337}$		0,53	
		S (grano medio)				$V_s = 81,3 \cdot N^{0,337}$		0,53	
		S (grano grueso)				$V_s = 80,1 \cdot N^{0,337}$		0,53	
		S (grano fino)	Holoceno			$V_s = 98,3 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		S (grano medio)				$V_s = 94,3 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		S (grano grueso)				$V_s = 96,7 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		S (grano fino)	Plioceno			$V_s = 142,4 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		S (grano medio)				$V_s = 135,6 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		S (grano grueso)				$V_s = 140,1 \cdot N^{0,250}$		0,62	
		A	Cuaternario		Otro	$V_s = 61,6 \cdot N^{0,25} \cdot D^{0,22}$		0,67	
			Holoceno			$V_s = 68,4 \cdot N^{0,21} \cdot D^{0,19}$		0,72	
			Pleistoceno			$V_s = 89,5 \cdot N^{0,21} \cdot D^{0,19}$		0,72	
		S (grano fino)	Cuaternario			$V_s = 67,8 \cdot N^{0,22} \cdot D^{0,23}$		0,69	
		S (grano medio)				$V_s = 63,9 \cdot N^{0,22} \cdot D^{0,23}$		0,69	
		S (grano grueso)				$V_s = 66,7 \cdot N^{0,22} \cdot D^{0,23}$		0,69	
		S (grano fino)	Holoceno			$V_s = 74,7 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
		S (grano medio)				$V_s = 73,3 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
		S (grano grueso)				$V_s = 78,1 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
		S (grano fino)	Plioceno			$V_s = 97,3 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
		S (grano medio)				$V_s = 95,5 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
		S (grano grueso)				$V_s = 101,7 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$		0,73	
Campbell et al	1979	A	Blando	E.E.U.U.	Otro	$V_s = 170 \cdot (D + 3,9)^{0,45}$	NA		Velocidad medida en FPS, profundidad en pies
		A	Medio			$V_s = 278 \cdot (D + 2,4)^{0,413}$			
		A	Firme			$V_s = 519 \cdot (D + 2,0)^{0,349}$			

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R ²	Observación
JRA	1980	S		Japón	A.1	$V_s = 80 \cdot N^{0,333}$	Sin corregir		
		C				$V_s = 100 \cdot N^{0,333}$			
Seed e Idriss	1981	A		E.E.U.U.	A.1	$V_s = 61 \cdot N^{0,50}$	Sin corregir		
Imai y Tonouchi	1982	A	Material Aluvial del Cuaternario y del Pleistoceno	Japón	A.1	$V_s = 97 \cdot N^{0,314}$	Sin corregir	0,868	PS logging
		S				$V_s = 87,8 \cdot N^{0,314}$		0,690	
		C				$V_s = 107 \cdot N^{0,274}$		0,721	
Seed et al.	1983	S		E.E.U.U.	A.1	$V_s = 56,4 \cdot N^{0,50}$	Sin corregir		-
					Otro	$V_s = 85 \cdot N_{60}^{0,17} \cdot D^{0,20}$	60%		
Barrow y Stokoe	1983	A		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 476 + 13,9 \cdot N$	Sin corregir	0,29	-
Sykora e Stokoe	1983	S		E.E.U.U.	A.1	$V_s = 100,5 \cdot N^{0,29}$	Sin corregir	0,840	Crosshole
Lin et al	1984	A		Taiwán	A.1	$V_s = 65,6 \cdot N^{0,502}$	Sin corregir		-
Fumal y Tinsley	1985	S		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 152 + 5,1 \cdot N^{0,27}$	Sin corregir		
Jinan	1987	A	Holoceno	China	Otro	$V_s = 116,1 \cdot (N + 0,3185)^{0,202}$	Sin corregir	0,700	Crosshole
			Holoceno			$V_s = 90,91 \cdot (D + 0,6206)^{0,215}$			Velocidad medida en m/s, profundidad en feet
			Pleistoceno tardío			$V_s = 30,75 \cdot (D + 0,4160)^{0,591}$			
Yoshida et al	1988	A		Japón	Otro	$V_s = 83 \cdot N^{0,25} \cdot D^{0,14}$			
		S	Fina		Otro	$V_s = 49 \cdot N^{0,25} \cdot \sigma_v^{0,14}$			
		S	fina a gruesa			$V_s = 56 \cdot N^{0,25} \cdot \sigma_v^{0,14}$			
Jamiolkowski et al	1988	M o C		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 69 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$			
Sykora y Koester	1988	A	Holoceno	E.E.U.U.	A.1	$V_s = 63 \cdot N^{0,43}$			
		A	Pleistoceno			$V_s = 132 \cdot N^{0,32}$			
Okamoto et al.	1989	S			A.1	$V_s = 125 \cdot N^{0,30}$			
Lee	1990	S	Depósitos Aluviales	Taiwán	A.1	$V_s = 57,40 \cdot N^{0,49}$	Sin corregir	0,62	
		C				$V_s = 114,43 \cdot N^{0,31}$		0,44	
		M				$V_s = 105,64 \cdot N^{0,32}$		0,73	
		S			Otro	$V_s = 57,97 \cdot N^{-0,01} \cdot D^{0,46}$		0,86	
		C				$V_s = 74,44 \cdot N^{0,16} \cdot D^{0,25}$		0,78	
		M				$V_s = 73,70 \cdot N^{0,14} \cdot D^{0,26}$		0,88	
Yokota et al.	1991	A		Japón	A.1	$V_s = 121 \cdot N^{0,27}$			

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R ²	Observación
Lee	1992	S		Taiwán	A.1	$V_s = 104,7 \cdot N^{0,296}$		0,449	
		C				$V_s = 154,17 \cdot N^{0,207}$		0,497	
		M				$V_s = 126,18 \cdot N^{0,268}$		0,619	
		M o C				$V_s = 146,59 \cdot N^{0,222}$		0,518	
		S			Otro	$V_s = 76,16 \cdot N^{0,076} \cdot D^{0,313}$		0,776	
		C				$V_s = 95,72 \cdot N^{0,124} \cdot D^{0,210}$		0,785	
		M				$V_s = 90,57 \cdot N^{0,140} \cdot D^{0,205}$		0,829	
		M o C				$V_s = 93,54 \cdot N^{0,125} \cdot D^{0,213}$		0,798	
Pitilakis et al.	1992	-	Relleno de Escombros	Grecia	A.1	$V_s = 155,1 \cdot N^{0,17}$			Crosshole, Downhole y Refracción sísmica
		S				$V_s = 162,0 \cdot N^{0,17}$			
		C	Blanda			$V_s = 165,7 \cdot N^{0,19}$			
		C	Firme			$V_s = 357,5 \cdot N^{0,19}$			
Kalteziotis et al	1992	A		Grecia	A.1	$V_s = 76,2 \cdot N^{0,24}$		0,820	
		S				$V_s = 49,1 \cdot N^{0,50}$		0,740	
		C				$V_s = 76,6 \cdot N^{0,45}$		0,890	
Athansopoulos	1994	A		Grecia	A.1	$V_s = 107,6 \cdot N^{0,36}$		0,730	
		S				$V_s = 85,3 \cdot N^{0,42}$		0,680	
		C				$V_s = 121,7 \cdot N^{0,33}$		0,770	
Dickenson	1994	S		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 88,4 \cdot (N + 1)^{0,30}$			
Andrus	1994	S	Gravosa	E.E.U.U.	Otro	$V_s = 68 \cdot N^{0,17} \cdot D^{0,20}$			
Raptakis et al.	1995	S	Suelta	Grecia	A.1	$V_s = 123 \cdot N^{0,29}$			
		S	Densidad media			$V_s = 100 \cdot N^{0,24}$			
		C	Blanda			$V_s = 105,7 \cdot N^{0,33}$			
		C	Firme			$V_s = 184,2 \cdot N^{0,17}$			
		G	Grava			$V_s = 192,4 \cdot N^{0,13}$			
Sisman	1995	A			A.1	$V_s = 32,8 \cdot N^{0,51}$			
Iyisan	1996	A	Depósitos Aluviales	Turquía	A.1	$V_s = 51,5 \cdot N^{0,516}$		0,810	
						$V_s = 71,2 \cdot N_1^{0,440}$	Presión efectiva	0,560	
Kayabali	1996	S	Aluvial	Turquía	Otro	$V_s = 175 + 3,75 \cdot N_{60}$	60% de Energía	0,41	
Jafari et al.	1997	A		Irán	A.1	$V_s = 22 \cdot N^{0,85}$			
Rollins et al	1998	G	Holoceno	E.E.U.U.	A.1	$V_s = 63 \cdot N_{60}^{0,43}$	Corrección por 60% de Energía	0,59	
		G	Pleistoceno			$V_s = 132 \cdot N_{60}^{0,32}$		0,48	
		-	Rellenos de Escombros			$V_s = 222 \cdot N^{0,06}$			

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R ²	Observación
Pitilakis	1999	S		Grecia	A.1	$V_s = 145 \cdot N_{60}^{0,178}$	Corrección por 60% de Energía		Crosshole, Downhole y Refracción sísmica
		C				$V_s = 132 \cdot N_{60}^{0,271}$			
Chien et al.	2000	S		Taiwán	A.1	$V_s = 22 \cdot N^{0,76}$		-	
Kiku et al.	2001	A		Grecia	A.1	$V_s = 68,3 \cdot N^{0,292}$			
Jafari et al.	2002	C		Irán	A.1	$V_s = 27 \cdot N^{0,73}$			Crosshole, Downhole y Refracción sísmica
		M				$V_s = 22 \cdot N^{0,77}$			
		C o M				$V_s = 19 \cdot N^{0,85}$			
Piratheepan	2002	S	CF<10%	E.E.U.U. Canadá Japón Taiwán	Otro	$V_s = 66,7 \cdot N^{0,25} \cdot D^{0,14}$		0,82	
		S	10%<CF<35%			$V_s = 72,3 \cdot N^{0,23} \cdot D^{0,15}$		0,95	
		S	CF<40%			$V_s = 72,9 \cdot N^{0,22} \cdot D^{0,13}$		0,85	
Andrus et al	2004	A		E.E.U.U.	A.1	$V_s = 87,8 \cdot N_{1,60}^{0,25}$	60% Energía y sobrepresión		
Holzer et al	2005	M		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 75,2 + 3,99D$			
Chapman et al	2006	S		E.E.U.U.	Otro	$V_s = 85,13 \cdot N^{0,153} \cdot \sigma_v^{0,147}$			
		C				$V_s = 92,25 \cdot N^{0,266} \cdot \sigma_v^{0,072}$			
Alfaro	2007	A		Colombia	Otro	$V_s = 1,40 \cdot D^{0,305}$	Sin corregir	0,39	Downhole
					A.1	$V_s = 99,783 \cdot N^{0,383}$		0,68	
					Otro	$V_s = 91,44 \cdot N^{0,298} \cdot D^{0,291}$		0,46	
Hansancebi y Ulusay	2007	A	Depósitos aluviales y detríticos	Turquía	A.1	$V_s = 90 \cdot N^{0,309}$	Sin corregir	0,73	Refracción sísmica
		S				$V_s = 90,8 \cdot N^{0,319}$		0,65	
		C				$V_s = 97,9 \cdot N^{0,269}$		0,75	
		A				$V_s = 104,8 \cdot N_{60}^{0,260}$	Corrección por 60% de Energía	0,71	
		S				$V_s = 131 \cdot N_{60}^{0,205}$		0,56	
		C				$V_s = 107,6 \cdot N_{60}^{0,237}$		0,75	
Ulugergerli y Uyanik	2007	A		Turquía	Otro	$SPT\ U = 113,41 \cdot Ln(V_s) - 469,32$		N.A.	Refracción sísmica. Nspt en función de Vs
						$SPT\ L = 7,137e^{-0,0013V_s}$			
Lee y Tsai	2008	S	Mioceno Holoceno y Pleistoceno	Taiwán	A.1	$V_s = 98,7 \cdot N^{0,305}$	Sin corregir	0,363	PS Loggi
		C o M				$V_s = 163,15 \cdot N^{0,192}$		0,425	
		S	-			$V_s = 128,28 \cdot N^{0,241}$		0,289	
		C o M	-			$V_s = 139,00 \cdot N^{0,258}$		0,370	

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R²	Observación
Hanumantharao y Ramana	2008	A	Depósitos Aluviales	India	A.1	$V_s = 82,6 \cdot N^{0,43}$		0,95	SASW
		S				$V_s = 79 \cdot N^{0,434}$		0,98	
		SM				$V_s = 86 \cdot N^{0,42}$		0,94	
Kockar y Akgun	2008	A	Aluviales	Turquía	A.1	$V_s = 56,94 \cdot N^{0,428}$	Sin corregir	0,643	
		A	Fluviales			$V_s = 37,05 \cdot N^{0,527}$		0,731	
Dikmen	2009	A	Depósitos aluviales del Cuaternario.	Turquía	A.1	$V_s = 58 \cdot N^{0,39}$		0,75	ReMi, MASW y Refracción sísmica.
		S				$V_s = 73 \cdot N^{0,33}$		0,72	
		M				$V_s = 60 \cdot N^{0,36}$		0,71	
		C				$V_s = 44 \cdot N^{0,48}$		0,82	
Maheswari et al	2010	A	Depósitos aluviales y costeros	India	A.1	$V_s = 95,64 \cdot N^{0,301}$	Sin corregir	0,835	MASW
		S				$V_s = 100,53 \cdot N^{0,265}$		0,840	
		C				$V_s = 83,91 \cdot N^{0,358}$		0,930	
		A				$V_s = 90,75 \cdot N_{60}^{0,304}$	Corrección por 60% de Energía	0,830	
		S				$V_s = 96,29 \cdot N_{60}^{0,266}$		0,830	
		C				$V_s = 83,27 \cdot N_{60}^{0,365}$		0,920	
Kuo et al.	2011	A		Taiwán	Otro	$V_s = 169,04 + 4,46N + 0,59D$	Sin corregir	0,710	
		Otro			$V_s = 93,11 \cdot N^{0,242} \cdot D^{0,136}$	0,671			
					$V_s = 114,55 \cdot N^{0,168} \cdot D^{0,143}$	0,685			
Akin, Kramer y Topal	2011	A	Aluvial	Turquía	Otro	$V_s = 59,44 \cdot N^{0,109} \cdot D^{0,426}$		0,890	
		S				$V_s = 38,55 \cdot N^{0,176} \cdot D^{0,481}$		0,940	
		M o C				$V_s = 78,10N^{0,116} \cdot D^{0,350}$		0,920	
		A	Plioceno			$V_s = 121,75 \cdot N^{0,101} \cdot D^{0,216}$		0,940	
		S				$V_s = 52,04 \cdot N^{0,359} \cdot D^{0,177}$		0,980	
		M o C				$V_s = 140,61 \cdot N^{0,049} \cdot D^{0,232}$		0,89	
		A	Aluvial		A.1	$V_s = 67,03 \cdot N^{0,467}$		-	
		S				$V_s = 56,15 \cdot N^{0,441}$		-	
		M o C				$V_s = 110,35 \cdot N^{0,263}$		-	
		A	Plioceno			$V_s = 38,64 \cdot N^{0,544}$		-	
		S				$V_s = 42,23 \cdot N^{0,474}$		-	
		M o C				$V_s = 140,88 \cdot N^{0,194}$		-	

Autor	Año	Tipo de Suelo	Descripción Adicional	País	Modelo	Relación	SPT	R ²	Observación
Thaker y Rao	2011	A		India	A.1	$V_s = 59,72 \cdot N^{0,42}$		0,77	MASW
		S				$V_s = 51,21 \cdot N^{0,45}$		0,78	
		C				$V_s = 62,41 \cdot N^{0,42}$		0,78	
Tsiambaos y Sabatakakis	2011	A	Depósitos cuaternarios y Neógenos	Grecia	A.1	$V_s = 105,70 \cdot N^{0,327}$	Corrección por 60% de Energía	0,60	Crosshole
		S				$V_s = 79,70 \cdot N^{0,365}$		0,63	
		M				$V_s = 88,80 \cdot N^{0,370}$		0,75	
		C				$V_s = 112,2 \cdot N^{0,324}$		0,61	
Anbazhagan et al	2012	A		India	A.1	$V_s = 68,96 \cdot N^{0,51}$			
		S				$V_s = 60,17 \cdot N^{0,56}$			
		M o C				$V_s = 106,63 \cdot N^{0,39}$			
Marto A. et al	2013	A		Malasia	A.1	$V_s = 69,76 \cdot N^{0,401}$		0,624	
		S				$V_s = 66,56 \cdot N^{0,420}$		0,752	
		M o C				$V_s = 87,72 \cdot N^{0,361}$		0,678	
Shooshpasha et al	2013	A		Irán	A.1	$V_s = 106,6 \cdot N^{0,215}$		0,235	
		A			Otro	$V_s = 88,1 \cdot N^{0,124} \cdot N^{0,202}$		0,421	
Pietrantoni et al	2013	A		Italia	A.1	$V_s = 158,97 \cdot N^{0,224}$		0,15	
		G o S	Grava y arena gravosa			$V_s = 195,01 \cdot N^{0,179}$		0,09	
		S	Arena			$V_s = 267,67 \cdot N^{0,068}$		0,02	
		S	Arena limosa			$V_s = 121,17 \cdot N^{0,251}$		0,41	
		M o C	Cohesivos			$V_s = 222,95 \cdot N^{0,058}$		0,01	
Fabbrocino et al	2014	A		Italia	A.1	$V_s = 90,35 \cdot N^{0,317}$		0,748	
		S				$V_s = 149,3 \cdot N^{0,192}$		0,362	
		M o C				$V_s = 110,5 \cdot N^{0,252}$		0,369	

C. INFORMACIÓN RELEVANTE DE LOS ESTUDIOS DE CASO

El Anexo C presenta los estudios de caso, indicando su ubicación, el destino de la edificación, la medición de ondas de corte mediante método ReMi y el resultado de los Ensayos de Penetración Estándar obtenidos en la ejecución de sondaje geotécnico¹.

¹ Todas las tablas e Ilustraciones del presente anexo son de elaboración propia a partir de los datos facilitados por BRAC INGENIERIA S.A.

C.1 Estudio de caso 1

El *Estudio de caso 1* fue realizado el 2014, se ubica en la ciudad de Concepción, está destinada a uso público, su categoría sísmica es II y el resultado de los trabajos en terreno es el siguiente.

Tabla C-1: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 1*"

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad (m)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Vs (m/s)
0,00 - 6,75	208,48	0,00 - 6,75	215,88
6,75 - 17,55	291,42	6,75 - 17,55	340,30
17,55 - 30,00	353,63	17,55 - 30,00	386,21
Vs30	286,69	Vs30	314,99

Tabla C-2: "Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar *Estudio de Caso 1*"

Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)
0,00	-	11,45	89	21,45	72
1,45	51	12,45	87	22,45	70
2,45	53	13,45	85	23,45	69
3,45	34	14,45	83	24,45	68
4,45	67	15,45	81	25,45	67
5,45	77	16,45	79	26,45	66
7,45	78	17,45	77	27,45	65
8,45	66	18,45	76	28,45	64
9,45	64	19,45	74	29,45	63
10,45	79	20,45	73	30,00	-

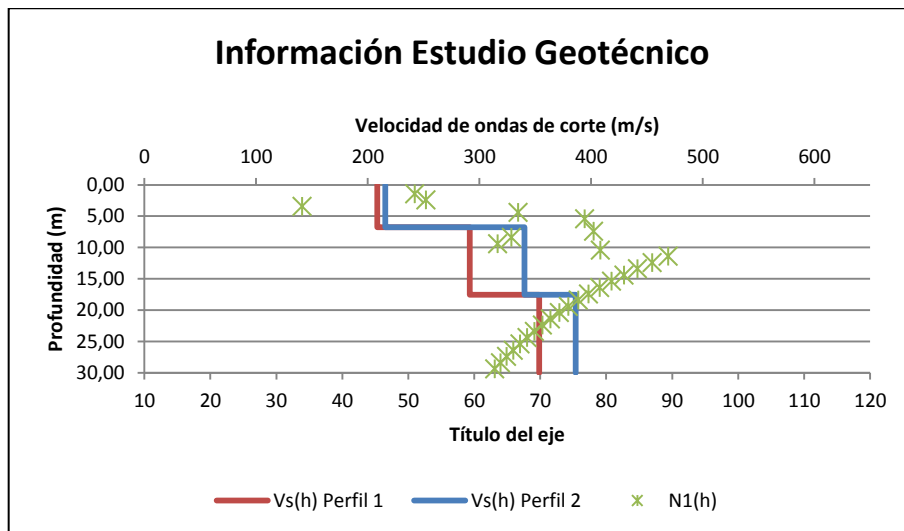


Ilustración C-1: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 1*"

C.2 Estudio de caso 2

El *Estudio de caso 2* fue realizado el 2013, se ubica en la ciudad de Santiago, está destinada a uso público, su categoría sísmica es II y el resultado de los trabajos en terreno es el siguiente.

Tabla C-3: “Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 2*”

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad (m)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Vs (m/s)
0,00 - 2,40	127,02	0,00 – 3,00	158,12
2,40 - 7,05	267,72	3,00 - 12,75	218,85
7,05 – 30,00	297,34	12,75 – 30,00	325,49
Vs30	264,44	Vs30	257,46

Tabla C-4: “Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar *Estudio de Caso 2*”

Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)
0,00	-	12,45	53	22,00	52
1,45	20	13,29	51	23,00	51
2,45	22	14,13	65	24,00	50
3,35	41	15,45	62	25,00	50
4,45	54	16,45	36	26,00	50
5,45	60	17,45	30	27,00	50
6,45	79	18,45	33	28,00	50
7,45	30	19,45	31	29,00	50
8,95	50	20,40	30	30,00	-
10,28	76	21,00	53		

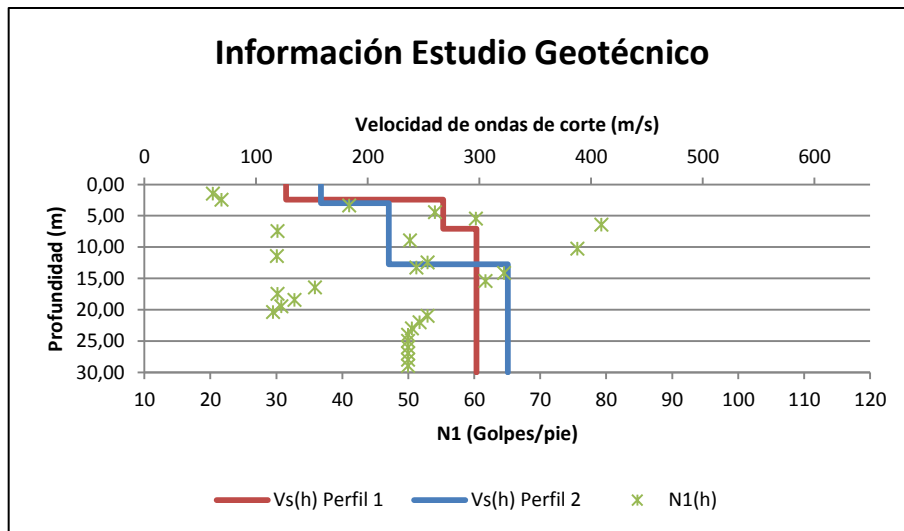


Ilustración C-2: “Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 2*”

C.3 Estudio de caso 3

El *Estudio de caso 3* fue realizado el 2015, se ubica en la ciudad de Santiago, está destinada a uso Privado, su categoría sísmica es III y el resultado de los trabajos en terreno es el siguiente.

Tabla C-5: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 3*"

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad (m)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Vs (m/s)
0,00 - 6,15	363,99	0,00 - 6,15	338,82
6,15 - 16,5	504,70	6,15 - 13,35	518,03
16,5 - 30,00	540,25	13,35 - 30,00	541,73
Vs30	480,83	Vs30	477,82

Tabla C-6: "Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar *Estudio de Caso 3*"

Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)
0,00	-	10,45	75	20,45	55
0,45	85	11,42	72	21,10	53
1,25	87	12,28	69	22,12	52
2,45	118	13,25	60	23,42	50
3,20	95	14,27	54	24,45	50
4,45	61	15,45	62	25,40	48
5,45	60	16,45	56	26,25	50
6,45	71	17,45	50	27,27	48
7,45	52	18,45	50	28,25	50
8,45	68	19,45	53	29,26	50
9,45	67	10,45	75		

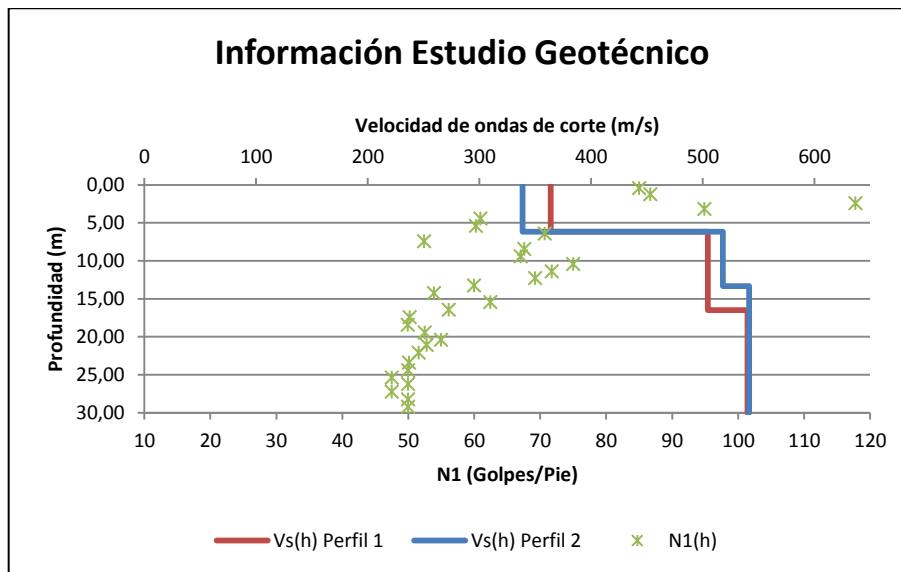


Ilustración C-3: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 3*"

C.4 Estudio de caso 4

El *Estudio de caso 4* fue realizado el 2015, se ubica en la ciudad de Puerto Montt, está destinada a uso Privado, su categoría sísmica es III y el resultado de los trabajos en terreno es el siguiente.

Tabla C-7: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 4*"

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad (m)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Vs (m/s)
0,00 - 10,20	245,05	0,00 - 6,45	228,55
10,20 - 21,90	328,50	6,45 - 12,30	497,34
21,90 - 30,00	607,00	12,30 - 30,00	527,43
Vs30	331,18	Vs30	407,93

Tabla C-8: "Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar *Estudio de Caso 4*"

Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)
0,00	-	10,45	31	21,45	28
1,45	24	11,45	32	22,45	20
2,45	33	12,45	31	23,45	26
3,45	26	13,45	27	24,45	22
4,45	26	14,45	22	25,45	25
5,45	25	15,45	20	26,45	24
6,45	25	16,45	22	27,45	26
7,45	26	17,45	23	28,45	23
8,45	24	18,45	22	29,45	26
9,45	24	19,45	27	30,00	-

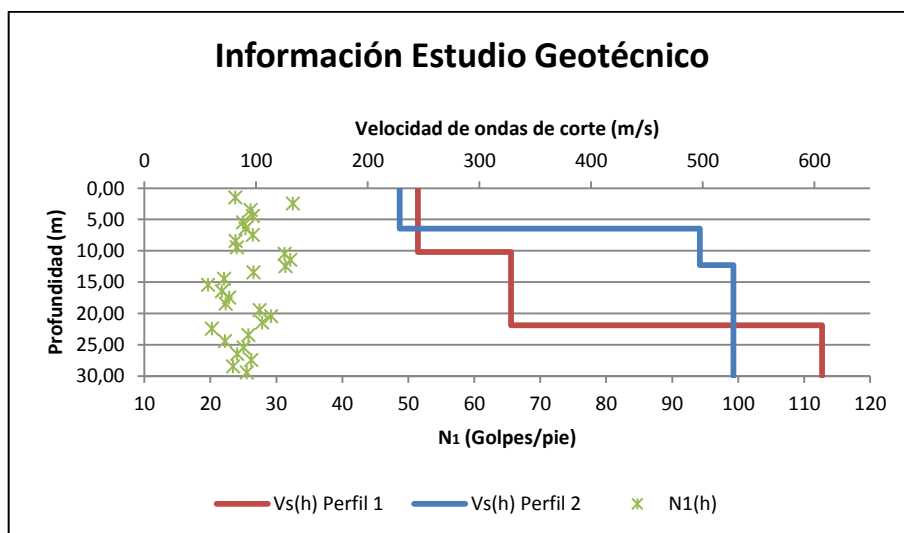


Ilustración C-4: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 4*"

C.5 Estudio de caso 5

El *Estudio de caso 5* fue realizado el 2015, se ubica en Santo Domingo, está destinada a uso Público, su categoría sísmica es II y el resultado de los trabajos en terreno es el siguiente.

Tabla C-9: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 5*"

Perfil 1		Perfil 2	
Profundidad (m)	Vs (m/s)	Profundidad (m)	Vs (m/s)
0,00 - 6,90	316,60	0,00 - 6,90	298,42
6,90 - 15,15	435,09	6,9 - 15,15	435,09
15,15 - 30,00	583,20	15,15 - 30	565,27
Vs30	453,04	Vs30	438,89

Tabla C-10: "Número de golpes del Ensayo de Penetración Estándar *Estudio de Caso 5*"

Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)	Profundidad (m)	N1 (Golpes/pie)
0,00	-	10,22	96	21,10	74
0,45	87	11,10	94	22,09	72
1,45	43	12,08	91	23,10	71
2,45	46	13,05	89	24,08	70
3,45	67	14,10	86	25,10	69
4,45	66	15,11	84	26,05	68
5,20	118	16,10	82	27,06	67
6,27	112	17,10	80	28,10	66
7,30	107	19,08	77	29,10	65
8,25	103	19,19	77	30,25	64
9,20	100	20,19	75		

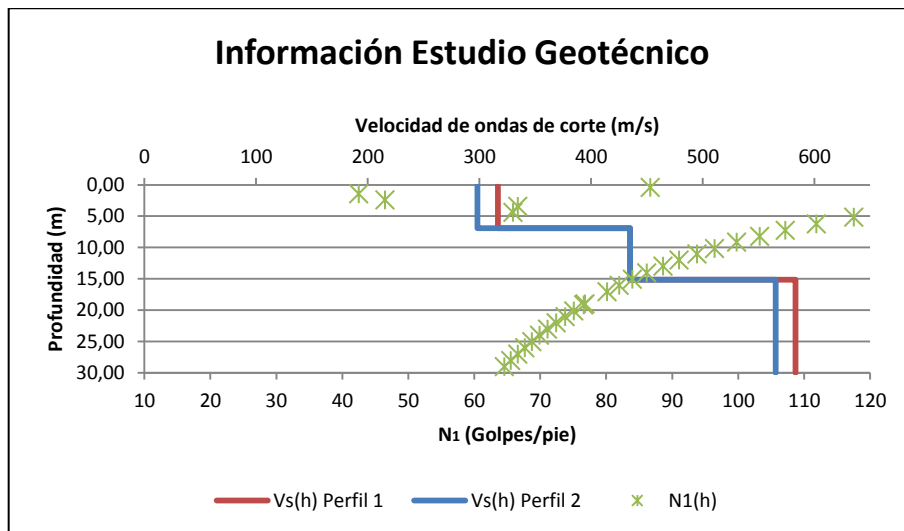


Ilustración C-5: "Perfiles de velocidad de ondas de corte *Estudio de Caso 5*"